

①⑨ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Übersetzung der  
europäischen Patentschrift

②⑦ EP 0 452 422 B1

⑩ DE 690 03 090 T 2

⑤① Int. Cl.<sup>5</sup>:  
**G 01 B 11/00**  
B 25 J 19/02  
G 01 B 11/24

②① Deutsches Aktenzeichen:	690 03 090.8
②⑥ PCT-Aktenzeichen:	PCT/FR90/00090
②⑥ Europäisches Aktenzeichen:	90 903 599.0
②⑦ PCT-Veröffentlichungs-Nr.:	WO 90/08939
②⑥ PCT-Anmeldetag:	5. 2. 90
②⑦ Veröffentlichungstag der PCT-Anmeldung:	9. 8. 90
②⑦ Erstveröffentlichung durch das EPA:	23. 10. 91
②⑦ Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA:	1. 9. 93
②⑦ Veröffentlichungstag im Patentblatt:	10. 2. 94

③⑩ Unionspriorität: ③② ③③ ③①

06.02.89 FR 8901595

⑦③ Patentinhaber:

SA Kréon Industrie, Lannemezan, FR

⑦④ Vertreter:

Wolf, G., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 63456 Hanau

⑧④ Benannte Vertragsstaaten:

AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, IT, LI, LU, NL, SE

⑦② Erfinder:

BRUNET, Michel, F-31130 Balma, FR; COSNARD,  
Eric Barbe d'Or, F-31180 Castelmaurou, FR;  
DELTOUR, Bernard, F-31120 Pinsaguel, FR

⑤④ KALIBRIERUNGSVERFAHREN EINES DREIDIMENSIONALEN FORMERFASSUNGSSYSTEMS UND SYSTEM  
ZUR DURCHFÜHRUNG DES GENANNTEN VERFAHRENS.

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patentamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 690 03 090 T 2

DE 690 03 090 T 2



Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Eichung eines Systems zur Formerfassung, das eine bewegliche Sensoreinheit enthält, die in der Lage ist, die absoluten Koordinaten  $(x, y, z)$ , die die Form eines dreidimensionalen Objektes in einem absolut genannten Bezugssystem  $(X, Y, Z)$  repräsentieren, auszugeben; das erfindungsgemäße Verfahren zielt darauf ab, die globale Transferrfunktion zwischen sogenannten Rohinformationen, die die Sensoreinheit des Erfassungssystems liefert, und den tatsächlichen Koordinaten  $(x, y, z)$  der Oberfläche des Objektes, das gerade erfaßt wird, aufzustellen. Die Erfindung erstreckt sich auf das Erfassungssystem, das die Ausführung des betreffenden Verfahrens ermöglicht, Erfassungssystem der Art, die ein festes Gehäuse umfaßt, mit dem das absolute Bezugssystem verbunden ist, ein bewegliches Terminalorgan, mit dem ein Terminalsystem genanntes Bezugssystem  $(R, S, T)$  verbunden ist, eine Reihe von Betätigungsorganen zur Bewegung des Terminalorgans relativ zum festen Gehäuse, Mittel (18, 7c, 6a, 6b, 5a) zur Bestimmung der Position und der Orientierung des Terminals relativ zum festen Gehäuse, die in der Lage sind, eine Matrix  $M_{AT}$  zum Übergang vom Terminalsystem  $(R, S, T)$  zum absoluten Bezugssystem  $(X, Y, Z)$  zu speichern, die oben erwähnte vom Terminalorgan getragene Sensoreinheit, die dazu eingerichtet ist, eine strukturierte Welle, d.h. einen Strahl bekannter Form zum dreidimensionalen Objekt zu senden und das vom genannten Objekt zurückgeworfene Echo aufzunehmen, und Mittel zur Speicherung der von der Sensoreinheit abgegebenen Informationen, die Rohinformationen genannt werden und die aufgenommenen Echos darstellen.

Derartige Erfassungssysteme (gelegentlich auch mit dem Begriff: Digitalisierungssystem oder "C.M.M." - "Coordinates Measuring Machine" bezeichnet) sind bekannt, die insbesondere in Tomographen, Ultraschallgeräten, Scannern etc. angewendet werden. In der Mehrheit dieser Systeme enthält die Sensoreinheit ein Beleuchtungssystem, das in der Lage ist, mindestens einen Lichtstrahl zum Objekt zu senden, und ein Videosystem, das in der Lage ist, das Objekt mit einer relativ zum Strahl des Beleuchtungssystems konstanten Parallaxe zu filmen, um Rohinformationen  $(p, q)$  in Abhängigkeit von den Spalten  $(p)$  und Zeilen  $(q)$  der Bilder der Punkte der Spur jedes Lichtstrahles auf dem Objekt auszugeben. In den Patenten FR 76.06176, FR 79.28885, FR 81.24418, WO 87/01194, EP 0.163.076, EP 0.222.498 sind der oder die Strahlen des Beleuchtungssystems vom lamellaren Typ (insbesondere Laserebene) und das System digitalisiert den Schnitt jeder Laserebene mit dem Objekt.



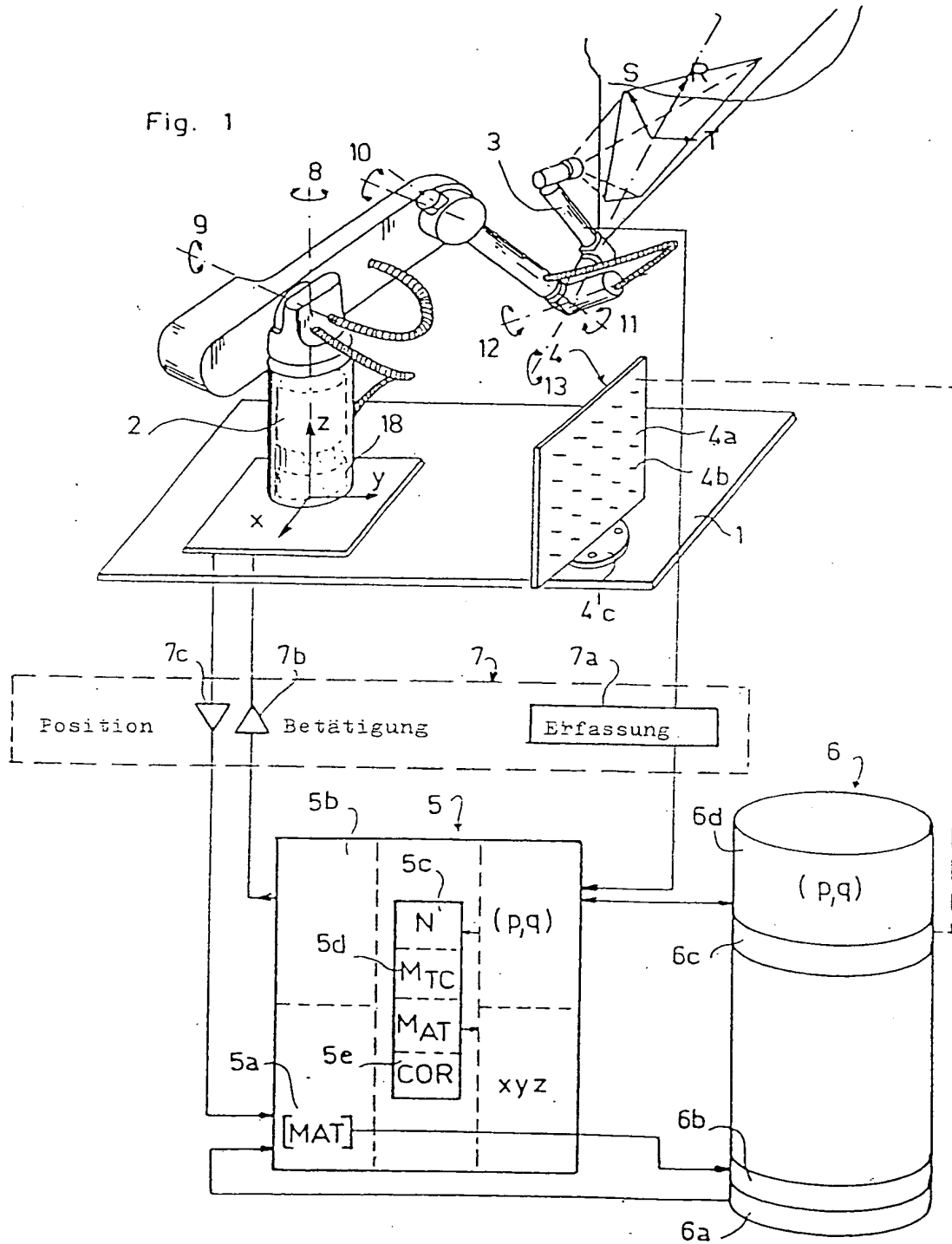
21. Erfassungssystem gemäß einem der Patentansprüche 13 bis 20, in dem

- die Reihe von Betätigungsorganen aus einer kinematischen Kette von Motoren besteht, von denen einer mit dem Gehäuse fest verbunden ist und ein anderer das Terminalorgan trägt,

- die Mittel zur Bestimmung der Position und der Orientierung des Terminals relativ zum festen Gehäuse mit jedem Motor verbundene Sensoren für die Winkelstellung umfassen, Mittel zum Zählen der von den Sensoren abgegebenen Signale, ein Rechenmodul, dafür programmiert, die Matrix  $M_{AT}$  aus den Informationen zu bilden, die die oben genannten Speichermittel und die genannten Zählmittel abgeben, und einen Speicher zur Speicherung der genannten Matrix  $M_{AT}$ .



Fig. 1





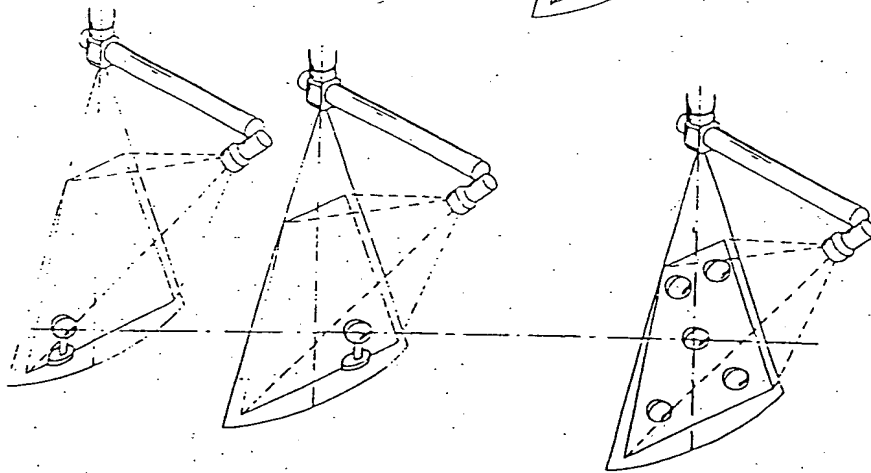
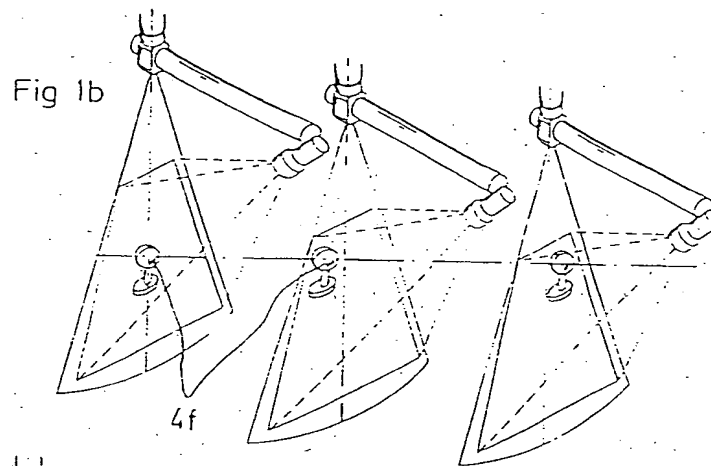
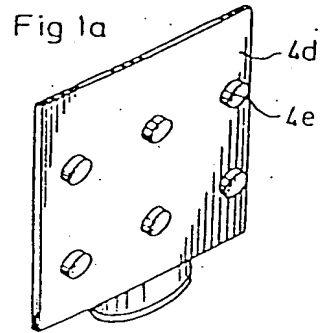




Fig. 2

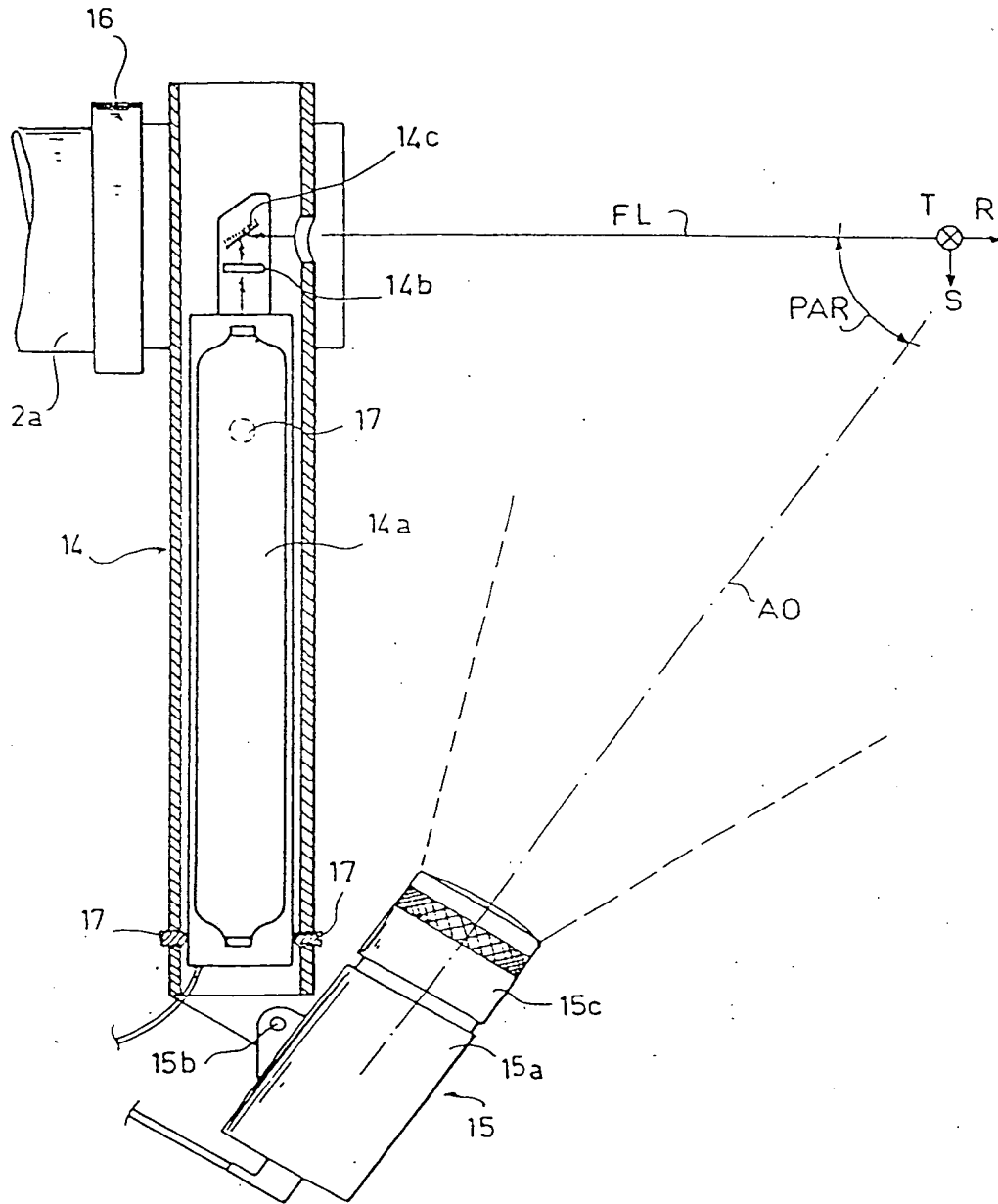




Fig. 3

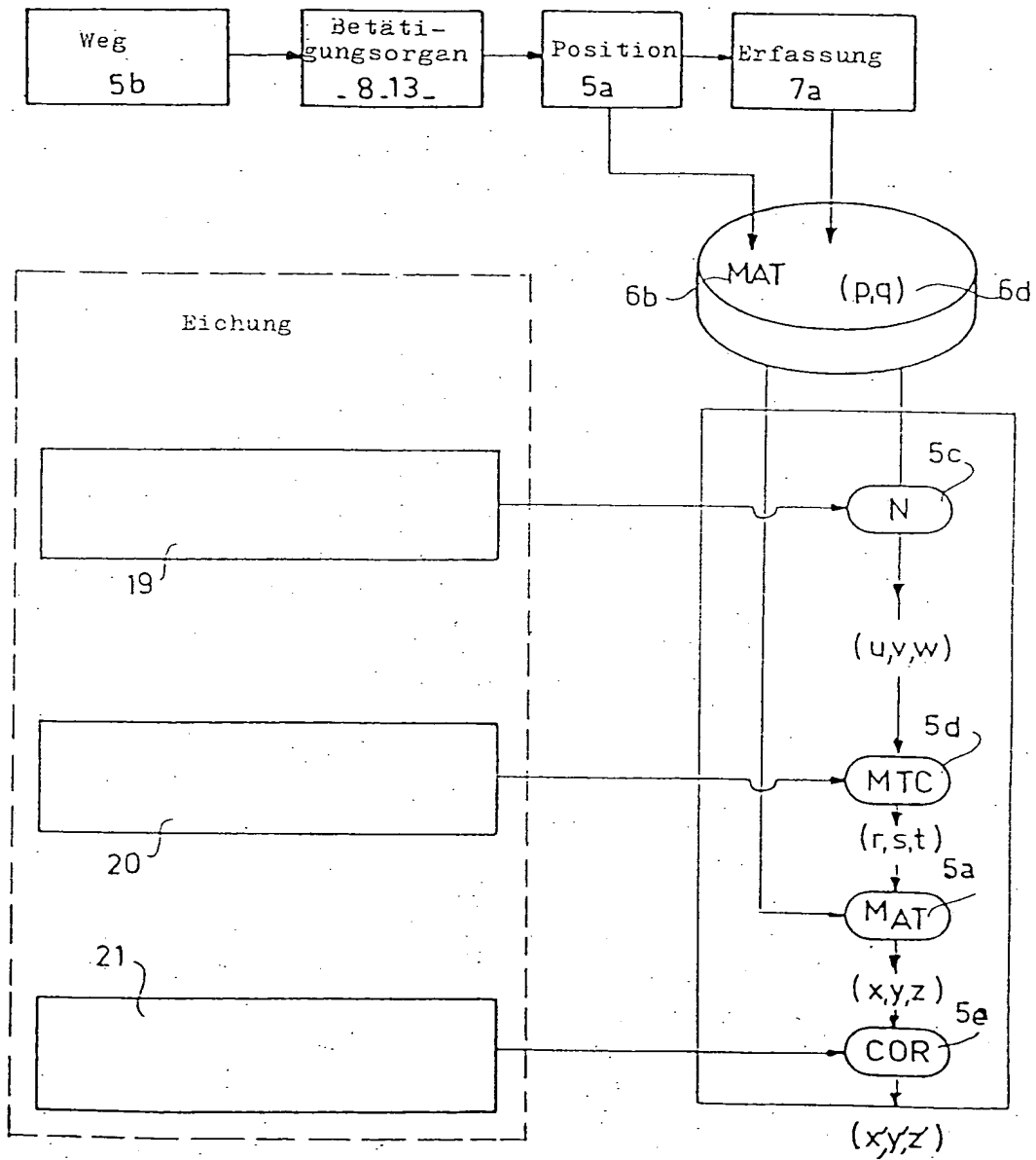




Fig. 4

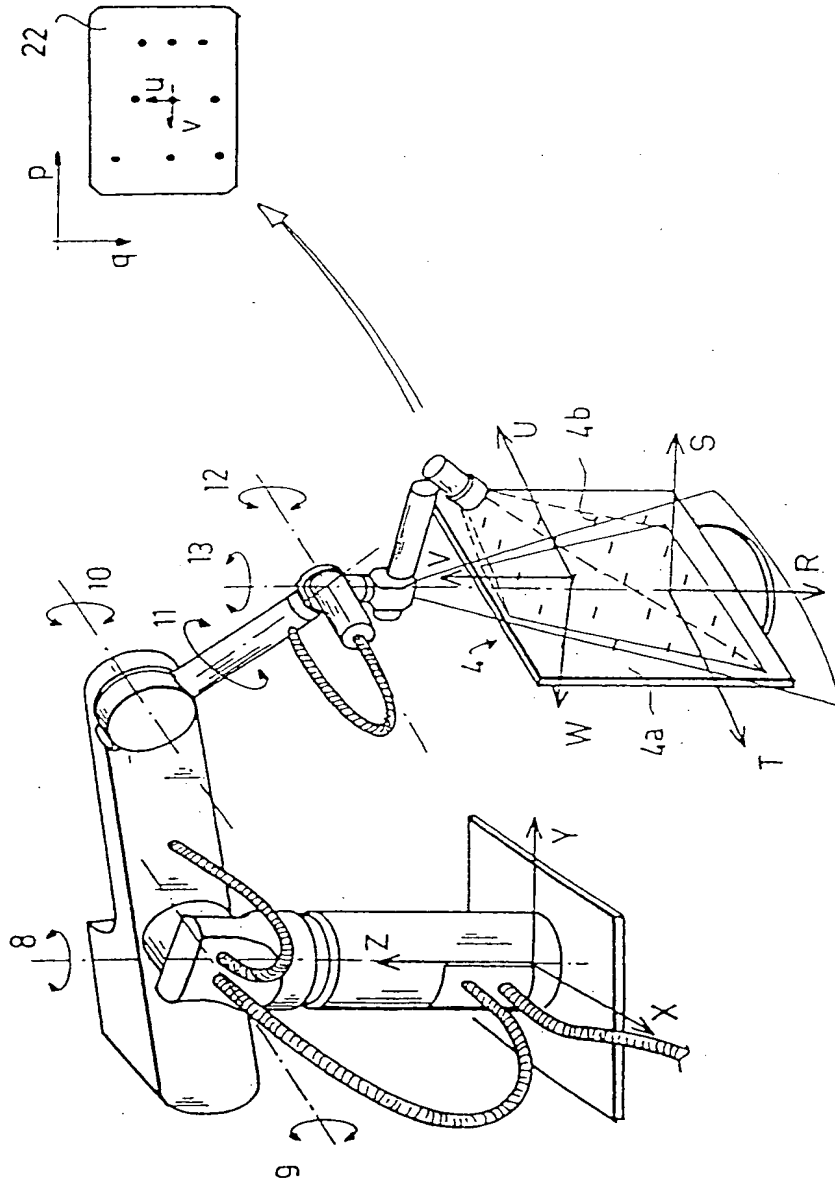




Fig. 5a

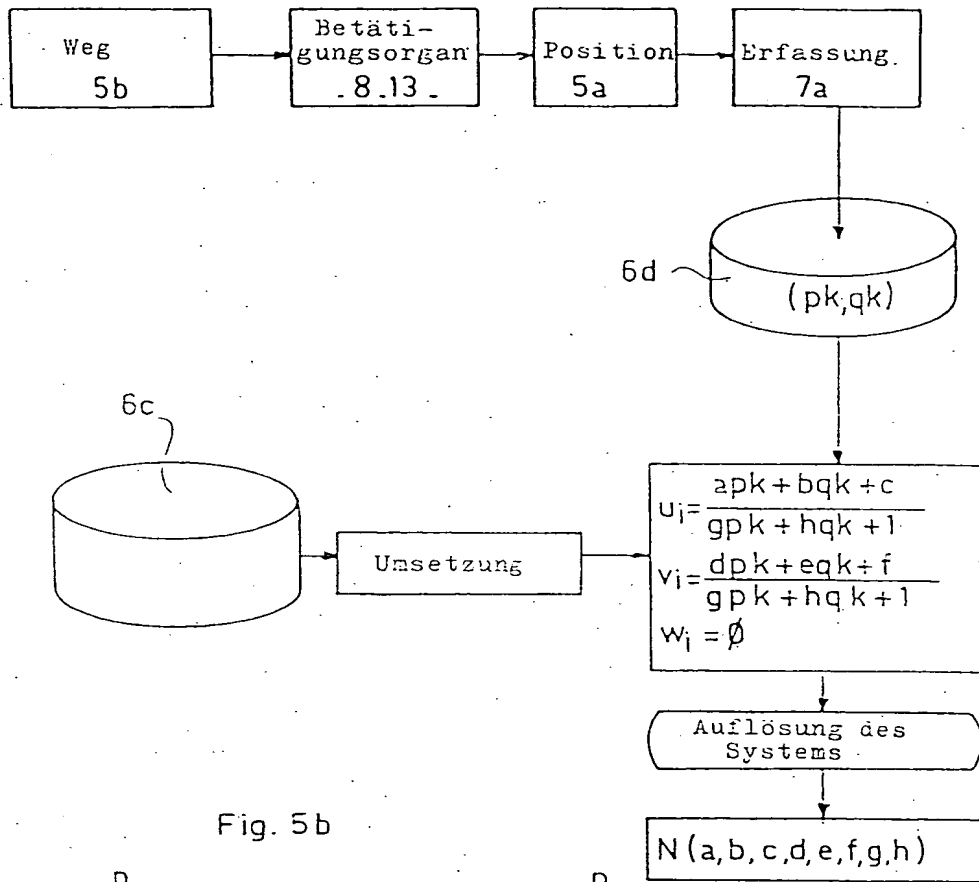


Fig. 5b

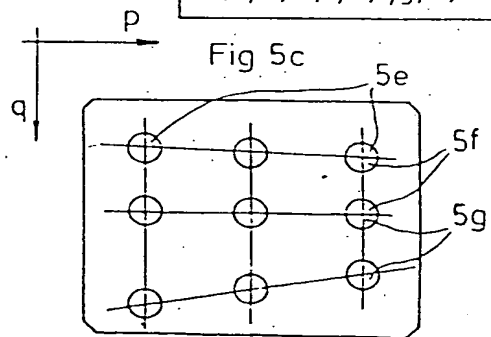
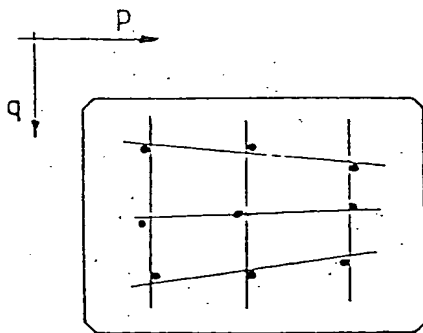




Fig. 6

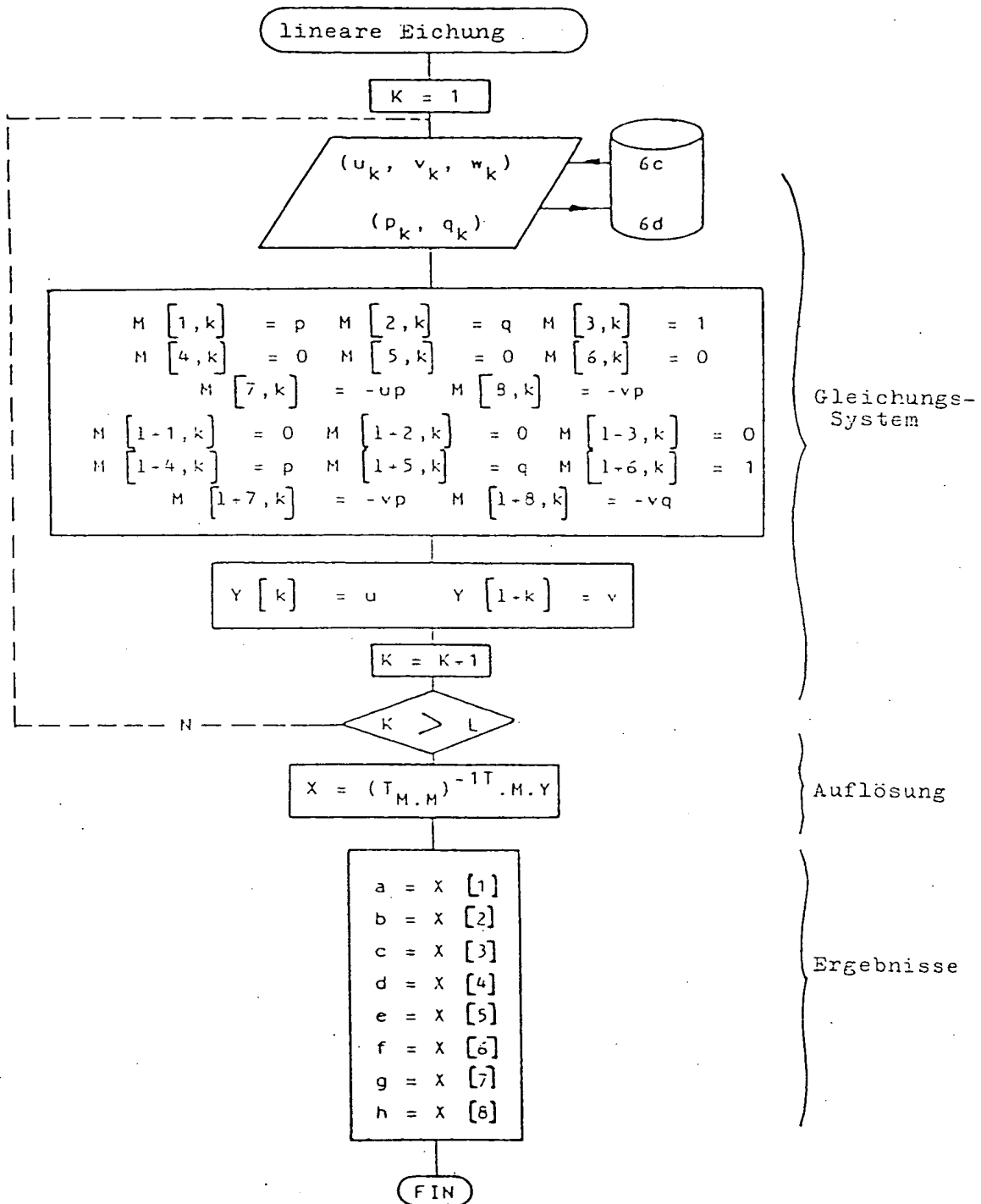




Fig. 7a

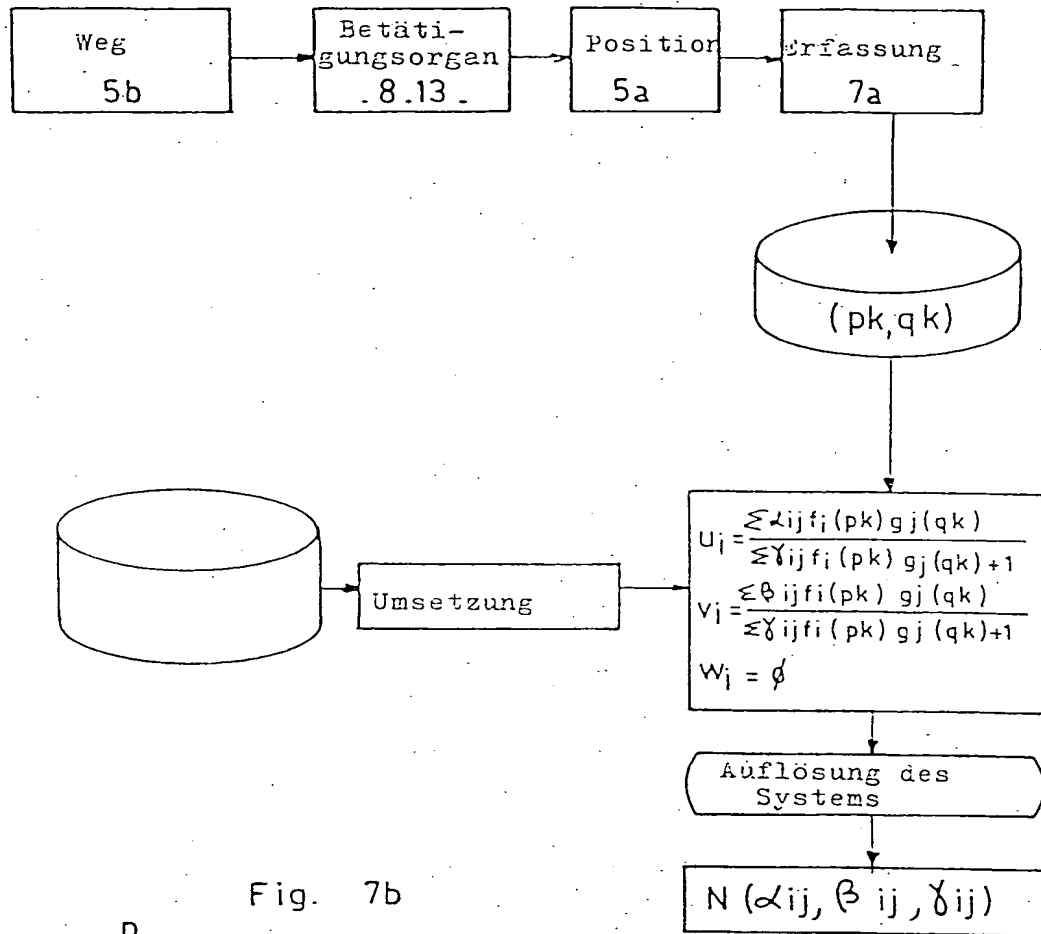


Fig. 7b

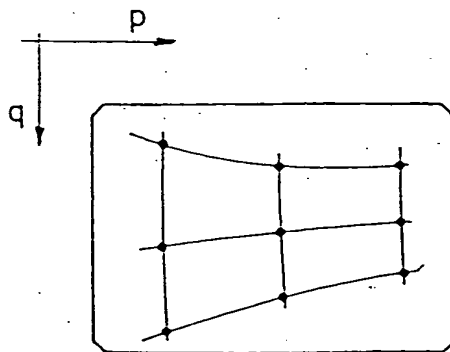




Fig. 8a

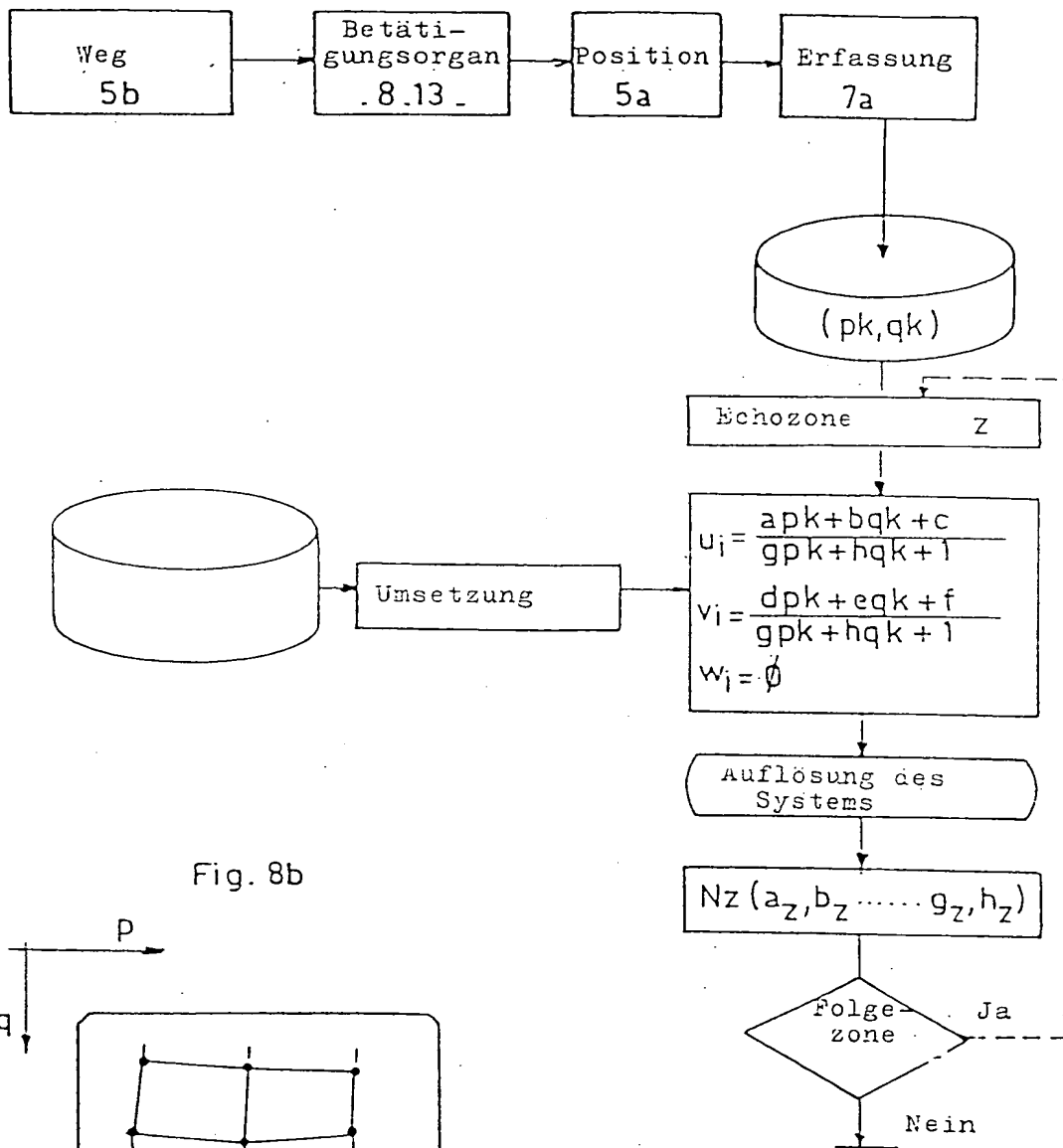


Fig. 8b

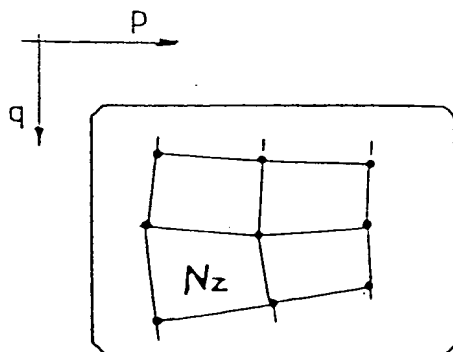




Fig. 9a

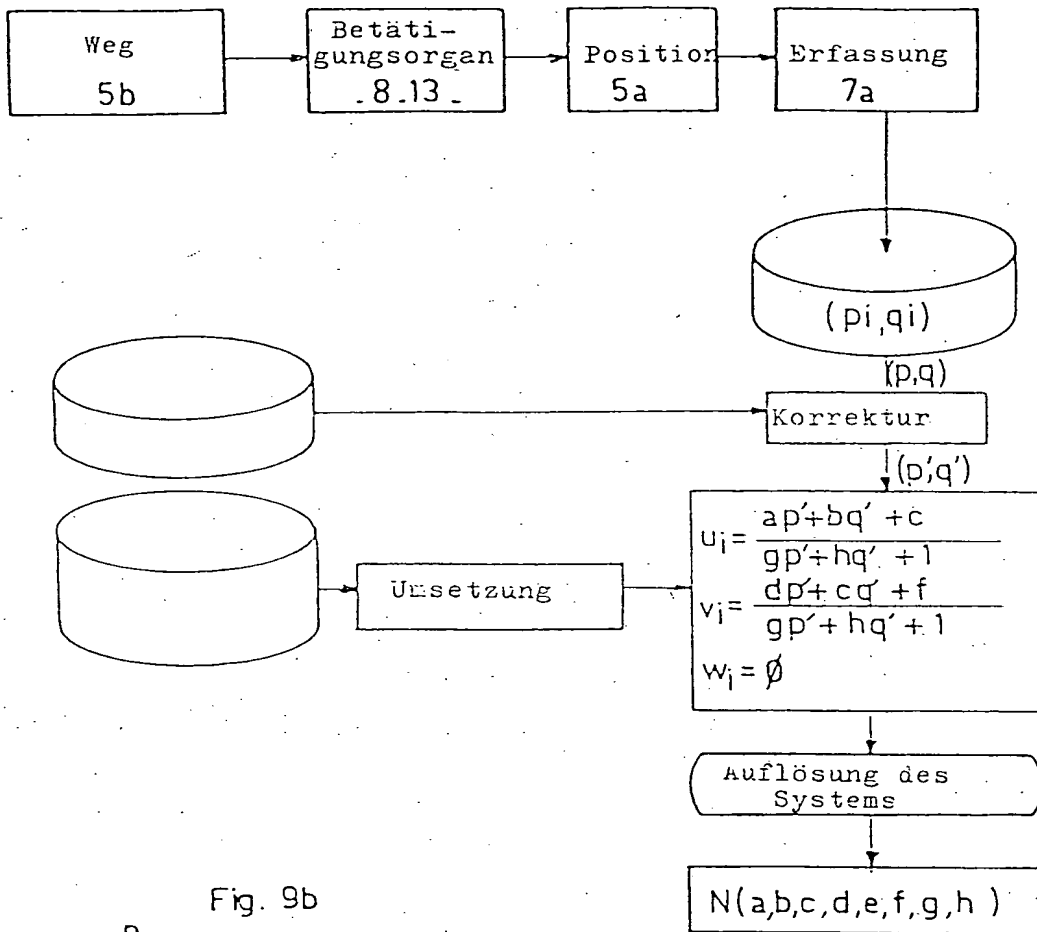


Fig. 9b

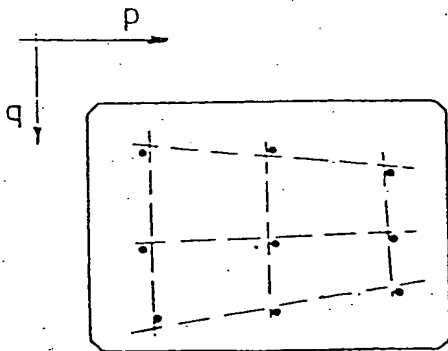
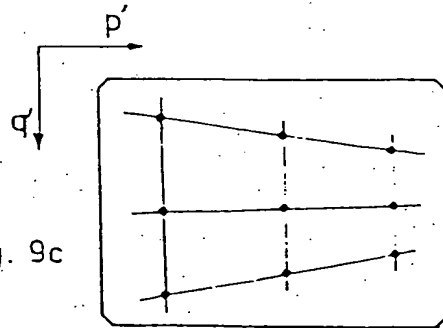


Fig. 9c





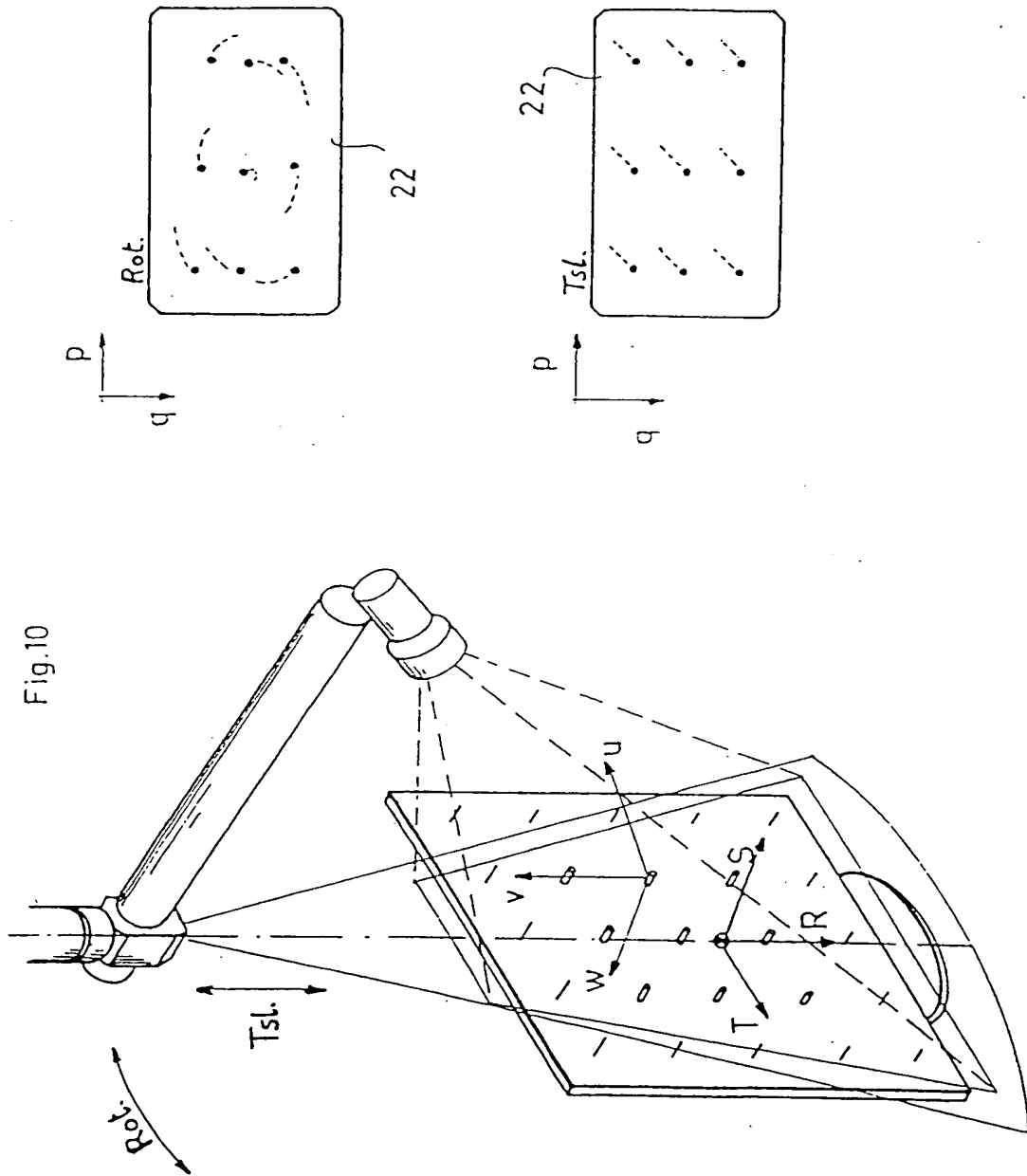




Fig. 11

12/13

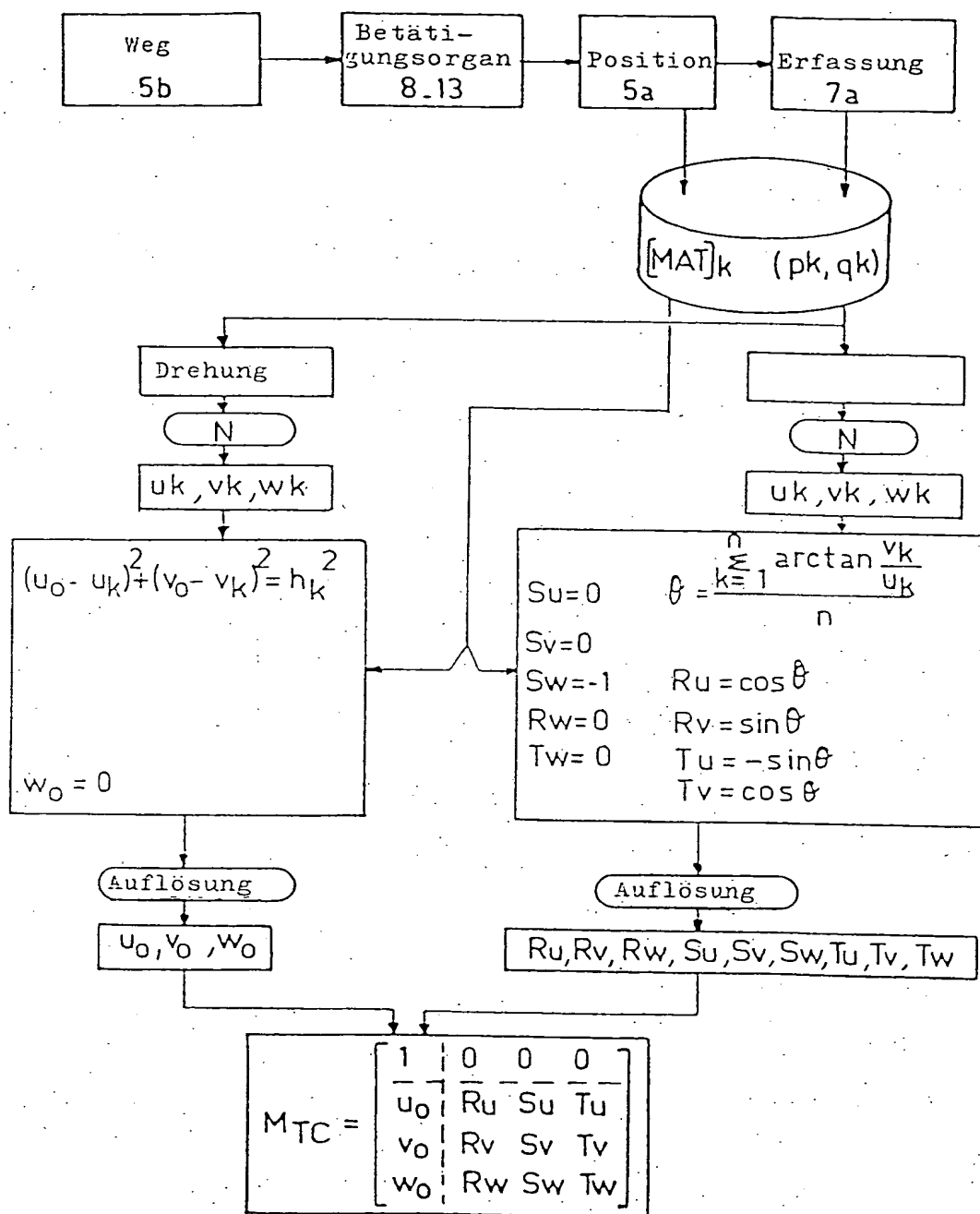
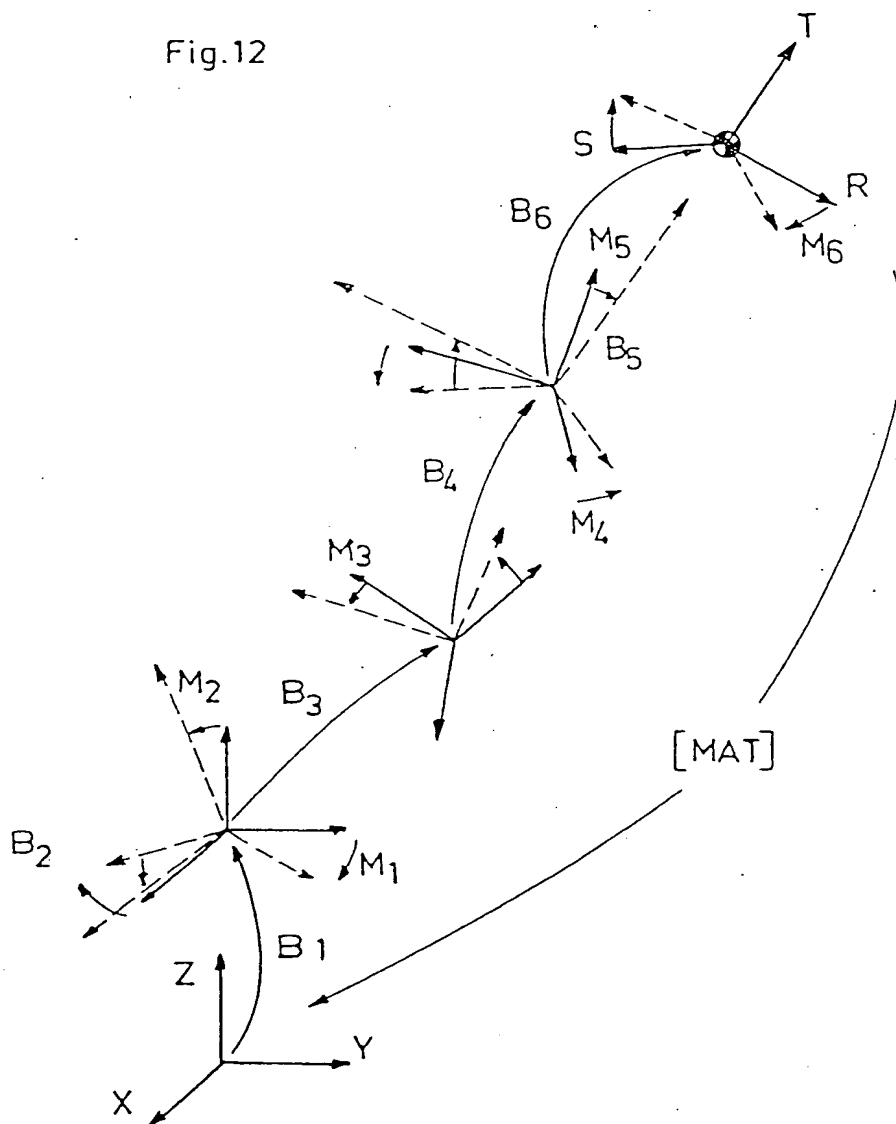




Fig.12





Zwischentransfunktionsform die folgende lineare Form hat:

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{apk + bqk + c}{gpk + hqk + 1} \\ v_i &= \frac{dpk + eqk + f}{gpk + hqk + 1} \\ w_i &= 0 \end{aligned}$$

wobei die Zwischentransfunktionsform  $N$  für die Gesamtheit dieser auf ihre entsprechenden Elementarzonen angewandten Elementärfunktionen aufgestellt wird.

19. Erfassungssystem gemäß einem der Patentansprüche 13, 14, 15, 16, 17 oder 18, in dem die Sensoreinheit ein Beleuchtungssystem enthält, das dazu in der Lage ist, mindestens einen lamellären Strahl auf das Objekt zu senden, und ein Videosystem, das dazu in der Lage ist, das Objekt mit einer konstanten Parallaxe relativ zu den Strahlen des Beleuchtungssystems zu filmen, um Rohinformationen  $(p, q)$  in Abhängigkeit von den Spalten  $(p)$  und Zeilen  $(q)$  der Bilder der Punkte der Spur jedes Strahles auf dem Objekt oder dem Kalibrierobjekt zu liefern.
20. Erfassungssystem gemäß Patentanspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß der Rechner mit einem Programm zur Berechnung der Zwischentransfunktionsform

$$N \left\{ \begin{aligned} u &= F(p, q) = \frac{\sum_{ij=0}^n \alpha_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)}{1 + \sum_{ij=1}^n \gamma_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)} \\ v &= G(p, q) = \frac{\sum_{ij=0}^n \beta_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)}{1 + \sum_{ij=1}^n \gamma_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)} \\ w &= 0 \end{aligned} \right.$$

programmiert ist, wobei die Funktionen  $f_i$ ,  $g_j$  eine beschränkte Entwicklungsbasis darstellen, wobei die Koeffizienten  $\alpha_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$ ,  $\gamma_{ij}$  durch Anwendung dieser Gleichungen auf eine Anzahl von Reliefpunkten des Kalibrierobjektes, die mindestens gleich  $1 + \frac{3n(n+3)}{4}$  ist, für die das Quadrupel  $(u, v, p, q)$  bekannt und gespeichert ist, und durch Lösung des erhaltenen linearen Gleichungssystems bestimmt werden.



14. Erfassungssystem gemäß Patentanspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß das Kalibrierobjekt eine Platte umfaßt, die mit einem Netz von Meßstäben versehen ist.
15. Erfassungssystem gemäß Patentanspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß das Kalibrierobjekt einen einzigen Meßstab umfaßt.
16. Erfassungssystem gemäß einem der Patentansprüche 13, 14 oder 15, in der Lage, eine Eichung gemäß Patentanspruch 9 vorzunehmen, dadurch gekennzeichnet, daß:
  - die Mittel zur Befestigung des Kalibrierobjektes dazu eingerichtet sind, die Befestigung des genannten Kalibrierobjektes in einer vorher festgelegten, bekannten Position relativ zum Gehäuse sicherzustellen,
  - die Speichermittel einen Speicherbereich für die entsprechenden Positionsdaten des genannten Kalibrierobjektes umfassen und einen Speicherbereich für die Matrix  $M_{AC}$  des Überganges vom Sensorsystem zum absoluten Bezugssystem,
  - der Rechner in der Lage und dafür programmiert ist, die Matrix  $M_{AC}$  zu bestimmen und die Matrix  $M_{TC}$  aus den Matrizen  $M_{AC}$  und  $M_{AT0}$  zu berechnen.
17. Erfassungssystem gemäß einem der Patentansprüche 13, 14, 15 oder 16, in der Lage, eine Eichung gemäß Patentanspruch 10 vorzunehmen, dadurch gekennzeichnet, daß:
  - das genannte System ein Bezugsobjekt enthält, das mindestens einen charakteristischen Punkt aufweist und Mittel zur Befestigung des Bezugsobjektes am Gehäuse,
  - die Speichermittel einen Speicherbereich für die Matrizen  $M_{AT1}, \dots, M_{ATl}$  umfassen,
  - der Rechner in der Lage und dafür programmiert ist, das Gleichungssystem nach  $M_{TC}$  aufzulösen.
18. Erfassungssystem gemäß Patentanspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß der Rechner mit einem Programm zur Auflösung des Gleichungssystems nach  $M_{TC}$  programmiert ist, in dem die Zwischentransferti-funktion  $N$  durch Aufteilung des Kalibrierobjektes in  $n$  Elementar-zonen und Berechnung einer elementaren Transferti-funktion  $N_e$  für jede Elementarzone ( $e$ ) berechnet wird, wobei jede



12. Eichverfahren gemäß Patentansprüchen 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Berechnung der Zwischentransferti-funktion  $N$  und die Berechnung der Matrix  $M_{TC}$  des Überganges vom Sensorsystem zum Terminalsystem jeweils durch Aufstellung eines abundanten Gleichungssystems und dessen Lösung im Sinne der kleinsten Quadrate erfolgt.
13. System zur Formerfassung, in der Lage, die Koordinaten  $(x, y, z)$ , die die Form eines dreidimensionalen Objektes in einem absolut genannten Bezugssystem  $(X, Y, Z)$  repräsentieren, auszugeben, wobei das genannte Erfassungssystem ein festes Gehäuse umfaßt, mit dem das absolute Bezugssystem verbunden ist, ein bewegliches Terminalorgan, mit dem ein Terminalsystem genanntes Bezugssystem  $(R, S, T)$  verbunden ist, eine Reihe von Betätigungsorganen zur Bewegung des Terminalorgans relativ zum festen Gehäuse, Mittel (18, 7c, 6a, 6b, 5a) zur Bestimmung der Position und der Orientierung des Terminals relativ zum festen Gehäuse, die in der Lage sind, eine Matrix  $M_{AT}$  zum Übergang vom Terminalsystem  $(R, S, T)$  zum absoluten Bezugssystem  $(X, Y, Z)$  zu speichern, eine vom Terminalorgan getragene Sensoreinheit, die dazu eingerichtet ist, eine strukturierte Welle zum dreidimensionalen Objekt zu senden und das vom genannten Objekt zurückgeworfene Echo aufzunehmen, und Mittel zur Speicherung der von der Sensoreinheit abgegebenen Informationen, die Rohinformationen genannt werden und die aufgenommenen Echos darstellen, wobei das genannte System dadurch gekennzeichnet ist, daß es Eichmittel zur Anwendung des Verfahrens gemäß einem der Patentansprüche 1 bis 12 enthält, umfassend:
- ein Kalibrierobjekt, das ein oder mehrere Reliefs bekannter Geometrie und Abmessungen aufweist,
  - Mittel zur Befestigung des Kalibrierobjektes am Gehäuse,
  - Speichermittel, einen Speicherbereich für die Informationen zur geometrischen Definition des Kalibrierobjektes und einen Speicherbereich für die Matrix  $M_{TC}$  des Überganges vom Sensorsystem zum Terminalsystem enthaltend,
  - und einen Rechner, in der Lage und dafür programmiert, die Umsetzung der Informationen zur geometrischen Definition in Koordinaten auszuführen, um die Zwischentransferti-funktion  $N$  zu berechnen, und die globale Transferti-funktion  $L$  nach dem Verfahren gemäß einem der Patentansprüche 1 bis 12 durch Matrizenmultiplikation zu berechnen.



10. Eichverfahren gemäß einem der Patentansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Matrix  $M_{TC}$  des Überganges vom Sensorsystem (U, V, W) zum Terminalsystem (R, S, T) bestimmt wird,

- indem mindestens ein charakteristischer Punkt eines Bezugsobjektes in  $I$  Positionen der Sensoreinheit erfaßt wird, um die die entsprechenden Echos darstellenden Rohinformationen ( $p_1, q_1, \dots, p_k, q_k, \dots, p_I, q_I$ ) zu erhalten,

- indem mittels der Zwischentransfunktionsfunktion  $N$  die entsprechenden Koordinaten ( $u_1, v_1, w_1, \dots, u_k, v_k, w_k, \dots, u_I, v_I, w_I$ ) im Sensorsystem berechnet werden,

- indem die für jede der Erfassungspositionen von den Bestimmungsmitteln gelieferten Matrizen  $M_{AT1}, \dots, M_{ATk}, \dots, M_{ATI}$  gespeichert werden,

- indem das folgende Gleichungssystem gelöst wird, um die Unbekannte  $M_{TC}$  zu berechnen:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = [M_{ATk}] \cdot M_{TC} \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \\ w_k \end{bmatrix} \quad 1 \leq k \leq I$$

wo  $\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$  die unbekannten Koordinaten des charakteristischen Punktes des Kalibrierobjektes sind, die bei der Lösung des Gleichungssystems durch Substitution eliminiert werden.

11. Eichverfahren gemäß Patentanspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die  $I$  Positionen der Sensoreinheit einerseits durch eine schrittweise Drehung des Terminalorgans um den Ursprung des Terminalsystems (R, S, T) und andererseits durch eine schrittweise Translationsbewegung parallel zu einer bekannten, mit dem genannten Terminalsystem (R, S, T) verbundenen Achse erhalten werden, so daß die Matrix  $M_{TC}$  aus der Position des Ursprunges des Terminalsystems im Sensorsystem (U, V, W) und der Orientierung des genannten Terminalsystems im Sensorsystem gewonnen wird, wobei die Lösung des genannten Gleichungssystems durch dessen Aufteilung in zwei unabhängige Untersysteme erfolgt, von denen das eine die Punkte verwendet, die durch die Drehung geliefert werden und die Position des genannten Ursprunges liefert, während das andere die Punkte verwendet, die durch die Translationsbewegung geliefert werden und die Orientierung des Terminalsystems (R, S, T) liefern.



7. Eichverfahren gemäß Patentanspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Zwischentransferti-funktion  $N$  berechnet wird, indem das Kalibrierobjekt in  $n$  Elementar-zonen unterteilt wird und indem für jede Elementarzone ( $e$ ) eine Elementartransferti-funktion  $N_e$  gemäß einem der Patentansprüche 5 oder 6 berechnet wird, wobei die Zwischentransferti-funktion  $N$  für die Gesamtheit dieser Elementarfunktionen aufgestellt wird, die auf ihre entsprechenden Elementar-zonen angewandt werden.

8. Eichverfahren gemäß Patentanspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Zwischentransferti-funktion  $N$  berechnet wird,

- indem vorab eine Linearisierungstabelle  $p'(p,q)$ ,  $q'(p,q)$  gespeichert wird, die die Verzerrungen des Erfassungssystems beschreibt,

- indem vorab die Rohinformationen  $(p, q)$  mit Hilfe der genannten Linearisierungstabelle korrigiert werden, um korrigierte Informationen  $p'$ ,  $q'$  zu erhalten,

- indem die Transferti-funktion  $N$  in der linearen Form gemäß Patentanspruch 4 berechnet wird:

$$N \begin{cases} u = F(p, q) = \frac{ap' + bq' + c}{gp' + hq' + 1} \\ v = G(p, q) = \frac{dp' + eq' + f}{gp' + hq' + 1} \\ w = 0 \end{cases}$$

9. Eichverfahren gemäß einem der Patentansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Matrix  $M_{TC}$  des Übergangs vom Sensorsystem  $(U, V, W)$  zum Terminalsystem bestimmt wird,

- indem das Kalibrierobjekt in einer vorher festgelegten, bekannten Position auf dem festen Gehäuse befestigt wird und die entsprechenden Daten gespeichert werden,

- indem aufgrund dieser Daten eine Matrix  $M_{AC}$  des Überganges vom Sensorsystem  $(U, V, W)$  zum absoluten Bezugssystem  $(X, Y, Z)$  für die Kalibrierposition bestimmt und gespeichert wird,

- indem die von den Bestimmungsmitteln in der Kalibrierposition gelieferte Matrix  $M_{AT}$  gespeichert wird, die mit  $M_{AT0}$  bezeichnet wird,

- und indem die Matrix  $M_{TC}$  aus den oben genannten Matrizen berechnet wird:  $M_{TC} = (M_{AT0})^{-1} \cdot M_{AC}$ .



5. Eichverfahren gemäß Patentanspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß eine Zwischentransferrfunktion N der folgenden linearen Form berechnet wird:

$$N \left\{ \begin{array}{l} u = F(p, q) = \frac{ap + bq + c}{gp + hq + 1} \\ v = G(p, q) = \frac{dp + eq + f}{gp + hq + 1} \\ w = 0 \end{array} \right.$$

wobei die Koeffizienten (a-h) bestimmt werden, indem diese Gleichungen auf mindestens vier Punkte der Reliefs des Kalibrierobjektes angewandt werden, für die das Quadrupel (u, v, p, q) bekannt und gespeichert ist, und das erhaltene lineare Gleichungssystem gelöst wird.

6. Eichverfahren gemäß Patentanspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß eine nicht-lineare Zwischentransferrfunktion N der Form

$$N \left\{ \begin{array}{l} u = F(p, q) = \frac{\sum_{ij=0}^n \alpha_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)}{1 + \sum_{ij=1}^n \gamma_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)} \\ v = G(p, q) = \frac{\sum_{ij=0}^n \beta_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)}{1 + \sum_{ij=1}^n \gamma_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)} \\ w = 0 \end{array} \right.$$

berechnet wird, in der  $f_i$ ,  $g_j$  eine beschränkte Entwicklungsbasis ist, die Koeffizienten  $\alpha_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$ ,  $\gamma_{ij}$  durch Anwendung dieser Gleichungen auf eine Anzahl von Reliefpunkten des Kalibrierobjektes, die mindestens gleich  $1 + \frac{3n(n+3)}{4}$  ist, für die das Quadrupel (u, v, p, q) bekannt und gespeichert ist, und durch Lösung des erhaltenen linearen Gleichungssystems bestimmt werden.



$$N \begin{cases} u = F(p, q, \dots) \\ v = G(p, q, \dots) \\ w = H(p, q, \dots) \end{cases}$$

zu berechnen, die die Koordinaten (u, v, w) im Sensorsystem (U, V, W) in Abhängigkeit von den Rohinformationen (p, q) liefert.

- die Position des Sensorsystems (U, V, W) im Terminalsystem (R, S, T) zu bestimmen und eine Matrix  $M_{TC}$  für den Übergang vom Sensorsystem zum Terminalsystem zu speichern,

- die Zwischentransfertiunktion N mit einerseits der Übergangsmatrix  $M_{TC}$  und andererseits der Übergangsmatrix  $M_{AT}$  zu multiplizieren und die globale Transfertiunktion  $L = M_{AT} \cdot M_{TC} \cdot N$  zu erhalten.

2. Eichverfahren gemäß Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein Kalibrierobjekt verwendet wird, das eine Platte umfaßt, die auf einer Fläche ein Netz aus Meßstäben trägt, und daß als definierende Informationen Koordinaten  $(u_k, v_k)$  gespeichert werden, die mit jedem Meßstab des Kalibrierobjektes in einem Bezugssystem (U, V) verbunden sind, das in der Ebene der Fläche des das Netz aus Meßstäben tragenden Kalibrierobjektes liegt.
3. Eichverfahren gemäß Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein virtuelles Kalibrierobjekt verwendet wird, das aus einem einzigen Meßstab gebildet wird, indem die Sensoreinheit in mehreren bekannten Eichpositionen angeordnet wird, indem als definierende Information Koordinaten  $(u_k, v_k)$  gespeichert werden, die in den verschiedenen Eichpositionen in einem mit der Sensoreinheit verbundenen Bezugssystem (U, V) verbunden sind, indem die die Echos des einzigen Meßstabes, die von der Sensoreinheit in den verschiedenen Eichpositionen erfaßt werden, darstellenden Rohinformationen (p, q, ...) gespeichert werden und indem diese Rohinformationen zusammengesetzt werden, um ein virtuelles Netz zu bilden, das das virtuelle Kalibrierobjekt darstellt.
4. Verfahren gemäß einem der Patentansprüche 1, 2 oder 3 für die Eichung eines Erfassungssystems, in dem die Sensoreinheit ein Beleuchtungssystem enthält, das in der Lage ist, mindestens einen lamellaren Lichtstrahl zum Objekt zu senden, und ein Videosystem, das in der Lage ist, das Objekt mit einer relativ zum Strahl des Beleuchtungssystems konstanten Parallaxe zu filmen, um Rohinformationen (p, q) in Abhängigkeit von den Spalten (p) und Zeilen (q) der Bilder der Punkte der Spur jedes Lichtstrahles auf dem Objekt oder dem Kalibrierobjekt zu liefern.



## Patentansprüche

1. Verfahren zur Eichung eines Systems zur Formerfassung, das in der Lage ist, die Koordinaten  $(x, y, z)$ , die die Form eines dreidimensionalen Objektes in einem absolut genannten Bezugssystem  $(X, Y, Z)$  repräsentieren, auszugeben, wobei das genannte Erfassungssystem ein festes Gehäuse umfaßt, mit dem das absolute Bezugssystem verbunden ist, ein bewegliches Terminalorgan, mit dem ein Terminalsystem genanntes Bezugssystem  $(R, S, T)$  verbunden ist, eine Reihe von Betätigungsorganen zur Bewegung des Terminalorgans relativ zum festen Gehäuse, Mittel (18, 7c, 6a, 6b, 5a) zur Bestimmung der Position und der Orientierung des Terminals relativ zum festen Gehäuse, die in der Lage sind, eine Matrix  $M_{AT}$  zum Übergang vom Terminalsystem  $(R, S, T)$  zum absoluten Bezugssystem  $(X, Y, Z)$  zu speichern, eine vom Terminalorgan getragene Sensoreinheit, die dazu eingerichtet ist, einen Strahl bekannter Form zum dreidimensionalen Objekt zu senden und das vom genannten Objekt zurückgeworfene Echo aufzunehmen, und Mittel zur Speicherung der von der Sensoreinheit abgegebenen Informationen, die Rohinformationen genannt werden und die aufgenommenen Echos darstellen, wobei das genannte Eichverfahren es ermöglicht, die globale Übertragungsfunktion  $L$  zwischen jeglichem zurückgeworfenen Echo und den entsprechenden absoluten Koordinaten  $(x, y, z)$  im absoluten Bezugssystem zu bestimmen, die vom Erfassungssystem ausgegeben werden sollen, und dadurch gekennzeichnet, daß es darin besteht:

- vorab Informationen geometrischer Art über ein Kalibrierobjekt zu speichern, das ein oder mehrere Reliefs bekannter Geometrie und Abmessungen aufweist,

- die Form des genannten Kalibrierobjektes mittels der Sensoreinheit zu erfassen, die in mindestens einer bestimmten Position relativ zum genannten Kalibrierobjekt, Eichposition(en) genannt, angeordnet ist, um die entsprechenden Rohinformationen  $(p, q, \dots)$ , die die von der genannten Sensoreinheit erfaßten Echos darstellen, zu speichern,

- für jede genannte Eichposition die das Kalibrierobjekt definierenden Informationen in Form von Koordinaten  $(u, v, w)$  in ein mit dem Sensor verbundenes und Sensorsystem  $(U, V, W)$  genanntes Bezugssystem umzusetzen,

- aus den Ergebnissen der genannten Erfassung und den das Kalibrierobjekt charakterisierenden Koordinaten  $(u, v, w)$  im Sensorsystem eine Zwischentransferfunktion



Positionsinformationen berechnet, die das Interface 7c liefert, und aus die kinematische Kette definierenden Informationen aus dem Speicherbereich 6a. Diese in der Robotertechnik an sich bekannte Berechnung ist in der Fig. 12 dargestellt. Wenn der (n+1)-te Motor am n-ten Motor angebracht ist, wird der Übergang vom Bezugssystem n+1 (das mit dem (n+1)-ten Motor verbunden sei) zum Bezugssystem n durch die Matrix

$$M_{n,n+1} = [B_{n,n+1}][M_{OT\ n+1}]$$

ausgedrückt.

$B_{n,n+1}$  ist eine konstante Matrix der Konstruktion des Roboters, die aus den die kinematische Kette definierenden Informationen des Speicherbereichs 6a bestimmt wird.

$M_{OT\ n+1}$  ist eine variable Matrix, die von der Position des (n+1)-ten Motors relativ zu einer Anfangsposition seines Sensors 18 abhängt und durch die Positionsinformationen aus dem Interface 7c bestimmt wird.

Wie in Fig. 12 dargestellt, ergibt sich im Fall von sechs Motoren:

$$M_{AT} = M_{0,1} \cdot M_{1,2} \cdot M_{2,3} \cdot M_{3,4} \cdot M_{4,5} \cdot M_{5,6}$$

wobei die Matrix  $M_{0,1}$  die Matrix des Übergangs vom ersten Motor 8 zum Bezugssystem des Gehäuses (X, Y, Z) ist, während die Matrix  $M_{5,6}$  die Matrix des Übergangs vom Terminalsystem (R, S, T) zum Motor 5 ist.



In einer vorgezogenen Ausführungsform werden die / Positionen der Sensoreinheit einerseits durch eine schrittweise Drehung des Terminalorgans um den Ursprung des Terminalsystems (R, S, T) und andererseits durch eine schrittweise Translationsbewegung parallel zu einer bekannten, mit dem genannten Terminalsystem (R, S, T) verbundenen Achse erhalten, so daß die Matrix  $M_{TC}$  aus der Position des Ursprunges des Terminalsystems im Sensorsystem (U, V, W) und der Orientierung des genannten Terminalsystems im Sensorsystem gewonnen wird, wobei die Lösung des genannten Gleichungssystems durch dessen Aufteilung in zwei unabhängige Untersysteme erfolgt, von denen das eine die Punkte verwendet, die durch die Drehung geliefert werden und die Position des genannten Ursprunges liefert, während das andere die Punkte verwendet, die durch die Translationsbewegung geliefert werden und die Orientierung des Terminalsystems (R, S, T) liefern.

Während der Rotation beschreiben die Meßstäbe im Sensorsystem (U, V, W) Kreisbögen um den Ursprung des Terminalsystems (Koordinaten  $u_0, v_0, w_0$ ), der damit durch Bestimmung des Mittelpunktes dieser Kreisbögen im Sinne der kleinsten Quadrate berechnet wird.

Während der Translationsbewegung beschreiben die Meßstäbe im Sensorsystem (U, V, W) zur Bewegungsrichtung des Terminalsystems (R, S, T) parallele Geradenabschnitte, dessen Orientierung damit im Sinne der kleinsten Quadrate im Sensorsystem in Form der Richtungskosinus ( $R_u, R_v, R_w; S_u, S_v, S_w; T_u, T_v, T_w$ ) der Vektoren R, S, T berechnet wird.

Die Matrix  $M_{TC}$  hat dann die folgende homogene Form:

$$M_{TC} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ u_0 & R_u & S_u & T_u \\ v_0 & R_v & S_v & T_v \\ w_0 & R_w & S_w & T_w \end{vmatrix}$$

Die Reihenfolge zur Berechnung dieser Matrix  $M_{TC}$  ist in Fig. 11 dargestellt.

Darüber hinaus wird die Matrix  $M_{AT}$  des Überganges vom Terminalsystem (R, S, T) zum absoluten Bezugssystem (X, Y, Z) durch das Modul 5a des Rechners aus



die korrigierten Informationen  $p'$ ,  $q'$  zu erhalten. Das Gleichungssystem wird dann wie im linearen Fall aufgestellt und gelöst.

Fig. 9b stellt die lineare Zwischentransfertiunktion ohne Anwendung der Korrektur dar und Fig. 9c stellt diese Funktion korrigiert dar (in der Form  $u = \text{konst.}$ ,  $v = \text{konst.}$  in der  $(p', q')$ -Ebene).

Das Eichverfahren besteht dann darin, die Matrix ( $M_{TC}$ ) des Überganges vom Sensorsystem zum Terminalsystem zu bestimmen, um ihr Produkt mit der wie oben angegeben berechneten Zwischentransfertiunktion  $N$  zu bilden.

Diese Bestimmung von  $M_{TC}$  erfolgt durch den Schritt der Bestimmung eines Bezugspunktes, der in Fig. 10 dargestellt ist; mit den entsprechenden, auf dem Kontrollmonitor 22 erscheinenden Bildern; dieser Schritt der Bestimmung eines Bezugspunktes besteht darin,

- mindestens einen charakteristischen Punkt eines Bezugsobjektes in  $I$  Positionen der Sensoreinheit zu erfassen, um die die entsprechenden Echos darstellenden Rohinformationen  $(p_1, q_1, \dots, p_k, q_k, \dots, p_I, q_I)$  zu erhalten,
- mittels der Zwischentransfertiunktion ( $N$ ) die entsprechenden Koordinaten  $(u_1, v_1, w_1, \dots, u_k, v_k, w_k, \dots, u_I, v_I, w_I)$  im Sensorsystem zu berechnen,
- die für jede der Erfassungspositionen von den Bestimmungsmitteln gelieferten Matrizen ( $M_{AT1}, \dots, M_{ATk}, \dots, M_{ATI}$ ) zu speichern,
- das folgende Gleichungssystem zu lösen, um die Unbekannte  $M_{TC}$  zu berechnen:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = [M_{ATk}] \cdot M_{TC} \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \\ w_k \end{bmatrix} \quad 1 \leq k \leq I$$

wo  $\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$  die unbekannten Koordinaten des charakteristischen Punktes des Kalibrierobjektes sind, die bei der Lösung des Gleichungssystems durch Substitution eliminiert werden.

Wie bereits angegeben, kann eine redundante Berechnung erhalten werden, indem

- im Fall kleiner Meßstäbe 9 Meßstäbe des Kalibrierobjektes als charakteristische Bezugspunkte genommen werden,
- im Fall dicker Meßstäbe 3 Mittelpunkte von Meßstäben als charakteristische Bezugspunkte genommen werden.



Fig. 7b stellt die so definierte Zwischentransfunktionsfunktion dar, die nichtgeradlinigen Kurven  $u = \text{konst.}$ ,  $v = \text{konst.}$  in der  $(p, q)$ -Ebene entspricht, die in der Lage sind, sich dem Netz der Meßstäbe trotz der Nichtlinearität des Systems am genauesten anzuschmiegen.

Fig. 8a stellt eine andere Rechenfolge dar, in der die Zwischentransfunktionsfunktion  $N$  berechnet wird, indem das Kalibrierobjekt in  $n$  Elementarzonen unterteilt und für jede Elementarzone ( $e$ ) eine Elementartransfunktionsfunktion  $N_e$  berechnet wird, wobei die Zwischentransfunktionsfunktion  $N$  durch die Gesamtheit dieser Elementarfunktionen dargestellt wird, die auf ihre entsprechenden Elementarzonen angewandt werden. Die Folge ist ähnlich der der Berechnung der vordefinierten Eichung, jedoch mit einer Rechenschleife für jede Zone. Dieses Verfahren ist bei geringen Nichtlinearitäten anwendbar, die es erlauben, eine geringe Zahl praktisch linearer Zonen zu definieren (beispielsweise 16 Zonen).

Fig. 8b stellt das Zusammensetzen der Zwischentransfunktionsfunktionen für die verschiedenen Zonen in der Form  $u = \text{konst.}$ ,  $v = \text{konst.}$  in der  $(p, q)$ -Ebene dar.

Fig. 9a stellt eine andere Rechenfolge dar, in der die Zwischentransfunktionsfunktion  $N$  berechnet wird,

- indem vorab eine Linearisierungstabelle  $p'(p, q)$ ,  $q'(p, q)$  gespeichert wird, die die Verzerrungen des Erfassungssystems beschreibt,
- indem vorab die Rohinformationen  $(p, q)$  mit Hilfe der genannten Linearisierungstabelle korrigiert werden, um korrigierte Informationen  $p'$ ,  $q'$  zu erhalten,
- indem die Transfunktionsfunktion  $N$  in der linearen Form gemäß Patentanspruch 4 berechnet wird:

$$N \left\{ \begin{array}{l} u = F(p, q) = \frac{ap' + bq' + c}{gp' + hq' + 1} \\ v = G(p, q) = \frac{dp' + eq' + f}{gp' + hq' + 1} \\ w = 0 \end{array} \right.$$

Die Linearisierungstabelle wird durch direkte Messung der Verzerrungen des Systems aufgestellt - optische, elektronische Verzerrungen - und enthält Korrekturkoeffizienten, die auf die Rohinformationen  $p, q$  anzuwenden sind, um



$$N \left\{ \begin{array}{l} u = F(p, q) = \frac{\sum_{ij=0}^n \alpha_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)}{1 + \sum_{ij=1}^n \gamma_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)} \\ v = G(p, q) = \frac{\sum_{ij=0}^n \beta_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)}{1 + \sum_{ij=1}^n \gamma_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)} \\ w = 0 \end{array} \right.$$

gewählt, in der  $f_i, g_j$  eine beschränkte Entwicklungsbasis ist, die Koeffizienten  $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}$  durch Anwendung dieser Gleichungen auf eine Anzahl von Reliefpunkten des Kalibrierobjektes, die mindestens gleich  $1 + \frac{3n(n+3)}{4}$  ist, für die das Quadrupel  $(u, v, p, q)$  bekannt und gespeichert ist, und durch Lösung des erhaltenen linearen Gleichungssystems bestimmt werden.

Die Nichtlinearitäten der Koeffizienten führen zu geringen Variationen (einige Prozent) der Zwischentransferrfunktion und diese Koeffizienten können also in Form einer beschränkten Entwicklung ausgedrückt werden.

Die Entwicklungsbasen  $f_i, g_j$  können die Form von Polynomen haben  $f_i(p_k) = p_k^i, g_j(q_k) = q_k^j$

Sie können ebenfalls eponentiell sein:  $f_i(p_k) = e^{i \cdot p_k}, g_j(q_k) = e^{j \cdot q_k}$

Durch Einsetzen dieser Entwicklungen in die Funktionen  $F, G$  und durch Zerlegung in Faktoren bezüglich der Koeffizienten  $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}$  ergibt sich ein System linearer Gleichungen in  $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}$  mit einer Anzahl von Unbekannten, die von der Ordnung  $n$  der Entwicklung abhängig ist.

Dieses System kann ebenfalls nach den kleinsten Quadraten aufgelöst werden, indem eine abundante Anzahl an Meßstäben gewählt wird.



Fig. 5b ist eine Darstellung der Zwischentransfertiunktion in der Form  $u = \text{konst.}$  und  $v = \text{konst.}$  in der  $(p, q)$ -Ebene.

Im Fall dicker Meßstäbe erfolgt die Lösung nach den Mittelpunkten der berechneten Kreise, die den Bögen der Helligkeitskreise am genauesten entsprechen, im Sinne der kleinsten Quadrate. Die Anzahl der Meßstäbe wird dann größer als 4 gewählt (4 bis 6), um für ausreichende Redundanz zu sorgen, um die Kohärenz der Lösung überprüfen zu können. Die Quantisierungsfehler bei den  $p_k$  und  $q_k$  der Mittelpunkte der Meßstäbe werden durch die Auflösung nach den kleinsten Quadraten der Kreise minimalisiert, die den aus 20 bis 30 Punkten bestehenden leuchtenden Bögen am genauesten entsprechen. Diese Methode der dicken Meßstäbe führt zu präziseren Ergebnissen, als die Methode der vielen kleinen Meßstäbe.

Fig. 5c stellt die Zwischentransfertiunktion bei dicken Meßstäben in der Form  $u = \text{konst.}$  und  $v = \text{konst.}$  in der  $(p, q)$ -Ebene dar.

Die Helligkeitsstellen 5e sind die Schnittpunkte des Lasers mit den dicken Meßstäben.

Die Kreise 5f ergeben dieses Netz von Meßstäben, das durch die Berechnung wiederhergestellt wird.

Die Kreismittelpunkte 5g sind dann Koordinaten  $p_k, q_k$  in reellen Zahlen in der  $(p, q)$ -Ebene.

Die Fig. 7a, 8a und 9a stellen Rechenfolgen im Fall von drei anderen Formen der Zwischentransfertiunktion dar: Nichtlinear, auf Elementarzonen definiert, durch Tabelle korrigiert; die Fig. 7b, 8b, 9b und 9c stellen diese Zwischentransfertiunktionen dar.

Im Fall der Fig. 7a eines nichtlinearen Systems (optische Aberration der Kamera, Videoverzerrung etc.) wird angenommen, daß die vorangehende lineare Form lokal gültig ist und daß die Koeffizienten  $a - h$  Funktionen des Punktes  $(p, q)$  sind; die Zwischentransfertiunktion wird dann in der Form



Meßstäben), in Koordinaten  $(u, v, w)$  jedes virtuellen Meßstabes im Sensorsystem  $(U, V, W)$  umgesetzt.

Im beschriebenen Fall der linearen Eichung wird die Form der Zwischentransfunktionsfunktion

$$N \begin{cases} u = F(p, q) = \frac{ap + bq + c}{gp + hq + 1} \\ v = G(p, q) = \frac{dp + eq + f}{gp + hq + 1} \\ w = 0 \end{cases}$$

gewählt, wobei die Koeffizienten  $(a-h)$  bestimmt werden, indem diese Gleichungen auf mindestens vier Punkte der Reliefs des Kalibrierobjektes angewandt werden, für die das Quadrupel  $(u, v, p, q)$  bekannt und gespeichert ist, und das erhaltene lineare Gleichungssystem gelöst wird, das auf  $I$  Meßstäbe (laufender Index  $k$ ) angewandt wird und das folgende lineare Gleichungssystem liefert:

$$1 \leq k \leq I \begin{cases} ap_k + bq_k + c + 0 + 0 + 0 - gu_k p_k - hu_k q_k = u_k \\ 0 + 0 + 0 + dp_k + eq_k + f - gv_k p_k - hv_k q_k = v_k \end{cases}$$

das allgemein in der Matrixform

$$MX = Y$$

geschrieben werden kann, wobei  $X$  der unbekannte Vektor  $a, b, c, d, e, f, g, h$  ist, der die Zwischentransfunktionsfunktion  $N$  definiert, und wobei  $M$  eine Tabelle der Dimension 8 Zeilen mal 2/ Spalten ist.

Die Lösung nach den kleinsten Quadraten ist gegeben durch

$$X = (TM \cdot M)^{-1} \cdot TM \cdot Y$$

Der Logikplan der Fig. 6 stellt die Aufstellung des Gleichungssystems und seine Lösung dar.

Im Fall kleiner Meßstäbe erfolgt die Lösung nach dem Schwerpunkt der aus 1, 2 oder 3 Pixeln bestehenden Helligkeitsstelle. Die Anzahl der Meßstäbe wird dann größer als 4 gewählt, insbesondere  $9 < I < 25$ , um für Redundanz zu sorgen und die Minimalisierung der Quantisierungsfehler von  $p_k$  und  $q_k$  zu ermöglichen, die mit der Auflösung der Kamera und der Probenahme der Erfassung verbunden sind.



Dieser letztgenannte Schritt, der an sich im Bereich der Robotertechnik bekannt ist, besteht darin, die Unvollkommenheiten der mechanischen Organe des Roboters während der Bewegungen mit Hilfe geeigneter meßtechnischer Meßinstrumente (Neigungsmesser, Längenmaßvergleicher, Fernrohre, Theodolithen etc.) zu ermitteln, um die Korrekturkoeffizienten zur Kompensation dieser Unvollkommenheiten zu bestimmen.

Fig. 4 zeigt das System während der Eichung in der sogenannten Eichposition, während die Fig. 5a und 6 den Programmablauf und den Algorithmus der Berechnung im Fall der linearen Eichung darstellen. Der zur Platte 4a parallele lamellare Lichtstrahl FL fällt auf die Meßstäbe 4b und die Kamera erfaßt die genannten Meßstäbe und gibt Rohinformationen (p, q) (Zeilen und Spalten der entsprechenden Echos) aus, von denen angenommen wird, daß sie auf einem Kamerakontrollmonitor 22 dargestellt werden. Diese Rohinformationen werden im Speicherbereich 6d gespeichert.

Da das Sensorsystem (U, V, W) in dieser Eichposition eine bekannte Stellung relativ zum Kalibrierobjekt hat, werden die das Kalibrierobjekt definierenden Informationen, die sich im Speicherbereich 6c befinden (Rasterschritt des Netzes zwischen den Meßstäben), in Koordinaten (u, v, w) jedes Meßstabes im Sensorsystem (U, V, W) umgesetzt. In der Praxis kann ein Sensorsystem gewählt werden, das durch den zentralen Meßstab verläuft, so daß zwei seiner Achsen zu den Reihen der Meßstäbe parallel verlaufen und die andere Achse senkrecht dazu. Diese Umsetzung wird durch den Rechner 5 ausgeführt, der für diesen Zweck programmiert wird.

Im Fall des virtuellen Kalibrierobjektes fällt der lamellare Strahl FL auf den einzigen Meßstab 4f und die Kamera erfaßt den genannten Meßstab und gibt die Rohinformationen (p, q) (Zeilen und Spalten des entsprechenden Echos) aus, von denen angenommen wird, daß sie auf einem Kamerakontrollmonitor dargestellt werden. Diese Rohinformationen werden in verschiedenen Stellungen der Sensoreinheit relativ zum einzigen Meßstab erfaßt, wie in Fig. 1b schematisch dargestellt, und im Speicherbereich 6d gespeichert. Da das Sensorsystem (U, V, W) bekannte Eichpositionen relativ zum einzigen Meßstab einnimmt, werden die das virtuelle Kalibrierobjekt definierenden Informationen, die sich im Speicherbereich 6c befinden (Rasterschritt des virtuellen Netzes zwischen virtuellen



- durch Einschaltung von Eichmitteln 19 eine Zwischentransferti-funktion  $N$  aufzustellen und in einem Speicher 5c des Rechners zu speichern, die einer im genannten Rechner enthaltenen Programmoperation zugehört,

- durch Einschaltung von Mitteln zur Bestimmung eines Bezugspunktes 20 eine Matrix  $M_{TC}$  des Überganges vom Sensorsystem  $(U, V, W)$  zum Terminalsystem  $(R, S, T)$  aufzustellen und in einem Speicher 5d des Rechners zu speichern,

- gegebenenfalls durch Mittel zur mechanischen Charakterisierung 21 eine Matrix  $COR$  zur Korrektur der mechanischen Fehler aufzustellen und in einem Speicher 5e des Rechners zu speichern.

Die Messung eines Objektes, d.h. die Erfassung der Koordinaten verschiedener Punkte seiner Oberfläche, erfolgt nach dem folgenden Verfahrensablauf:

- Programmierung einer Bahn des Roboters durch das Steuermodul 5b auf die Beleuchtung der Oberfläche des zu erfassenden Objektes,

- Ausführung der entsprechenden Bewegungen durch die Motoren 8-13,

- Speicherung der aufgenommenen Rohinformationen  $(p, q)$  im Speicher 6d bei jeder Stellung auf der Bahn,

- Speicherung der durch die Mittel zur Bestimmung der Position und der Orientierung des Terminals relativ zum festen Gehäuse aufgestellten Matrix  $M_{AT}$  im Speicherbereich 6b,

- Anwendung der Zwischentransferti-funktion  $N$  auf die Rohinformationen  $(p, q)$ , um die Koordinaten  $(u, v, w)$  des entsprechenden Punktes des Objektes im Sensorsystem  $(U, V, W)$  zu erhalten,

- Anwendung der Übergangsmatrix  $M_{TC}$  auf diese Koordinaten  $(u, v, w)$ , um die im Terminalsystem  $(R, S, T)$  entsprechenden Koordinaten  $(r, s, t)$  zu erhalten,

- Anwendung der Übergangsmatrix  $M_{AT}$  auf diese Koordinaten  $(r, s, t)$ , um die im absoluten Bezugssystem  $(X, Y, Z)$  entsprechenden Koordinaten  $(x, y, z)$  zu erhalten,

- gegebenenfalls Korrektur dieser Koordinaten  $(x, y, z)$  durch Anwendung der Korrekturmatrix  $COR$ .

Die folgende Beschreibung erläutert das Eichverfahren durch das beschriebene System, Verfahren, das in drei Schritte unterteilt werden kann: Eichung, Bestimmung des Bezugspunktes, Charakterisierung.



genannt) besteht der erste Schritt der Eichung darin, im Sinne der kleinsten Quadrate die Kreise bekannten Durchmessers zu suchen, die den von der Kamera digitalisierten Kreisbögen am genauesten entsprechen. Die charakteristischen Punkte des Kalibrierobjektes sind dann die Mittelpunkte der wiederhergestellten Kreise.

Es ist auch, wie in Fig. 1b dargestellt, möglich, ein virtuelles Kalibrierobjekt aus einem einzigen Meßstab 4f zu bilden. Die Folge von Schemata der Fig. 1b stellt verschiedene Positionen der Sensoreinheit relativ zum Meßstab für den Fall dar, in dem die Laserebene zu einer der Bewegungsachsen der kinematischen Kette parallel ist. Die Aufzeichnung und Überlagerung der verschiedenen Bilder, die in den verschiedenen bekannten Positionen des Sensors (Eichpositionen genannt) aufgenommen wurden, erlaubt die Bildung eines virtuellen Netzes, das das virtuelle Kalibrierobjekt darstellt, und die Rückführung auf die vorangehenden Fälle eines materiellen Kalibrierobjektes.

Das Kalibrierobjekt 4 ist mit Befestigungsmitteln, wie etwa einem Sockel des Kalibrierobjektes 4c, der an das Gehäuse 1 geschraubt ist, am genannten Gehäuse in einer derartigen Position befestigt, daß der lamellare Lichtstrahl der Sensoreinheit 3 parallel zur Ebene der Platte 4a des Kalibrierobjektes positioniert werden kann, so daß er auf dessen Meßstäbe 4b fällt. Für den Eichungsschritt, der der erste Schritt des Eichverfahrens ist, ist ein Sensorsystem (U, V, W) genanntes Bezugssystem mit dem lamellaren Lichtstrahl verbunden, um in dieser Eichstellung über eine vorbestimmte Position relativ zum Kalibrierobjekt zu verfügen.

Im betrachteten Beispiel ist das Kalibrierobjekt am Gehäuse in einer festen Stellung befestigt, die jedoch aufgrund des Schrittes der Bestimmung des Bezugspunktes, der in der weiter unten dargestellten Weise durchgeführt wird, nicht präzise bekannt zu sein braucht. Es sei bemerkt, daß dieser Schritt der Bestimmung eines Bezugspunktes in einer anderen Form der Durchführung des Eichverfahrens um den Preis einer präzisen und bekannten Befestigung des Kalibrierobjektes am Gehäuse unterdrückt werden kann, wie weiter unten gezeigt wird.

Fig. 3 ist ein Flußdiagramm, das den Ablauf einer Messung nach Eichung des Systems zeigt. Das Eichverfahren erlaubt es,



Das Interface enthält unter anderem Mittel 7c zum Zählen der Signale, die aus den Sensoren 18 stammen, die an den Rechner Informationen abgeben, die die Position der Motoren darstellen. Die Speichermittel 6 umfassen einen Speicherbereich 6a, in dem Daten über den mechanischen Aufbau des Roboters gespeichert sind (Länge der Arme, Winkelstellung der Motorachsen, Endstellung etc.). Der Rechner 5 enthält ein Rechenmodul 5a, das dafür programmiert ist, zu jedem Zeitpunkt aus den Informationen, die aus den Zählmitteln 7c stammen, und den Informationen, die im Speicherbereich 6a gespeichert sind, eine Matrix  $M_{AT}$  des Überganges vom Terminalsystem (R, S, T) zum absoluten Bezugssystem zu erzeugen. Dieses Verfahren der Robotertechnik und die entsprechenden Matrixrechnungen sind an sich bekannt und werden nicht weiter ausgeführt. Diese Matrix wird in einem anderen Speicherbereich 6b der Speichermittel gespeichert.

Die Sensoren für die Winkelstellung 18, die Zählmittel 7c, die Speicherbereiche 6a und 6b und das Rechenmodul 5a werden in üblicher Weise mit dem allgemeinen Ausdruck: Mittel zur Bestimmung der Position und der Orientierung des Terminals relativ zum festen Gehäuse bezeichnet, deren Zweck darin besteht, die vorgenannte Matrix  $M_{AT}$  zu erzeugen und zu speichern.

Das Kalibrierobjekt 4 weist Reliefs mit bekannter Geometrie und Abmessungen auf, die vorab in einem Speicherbereich 6c der Speichermittel gespeichert werden. Den beabsichtigten Anwendungen gemäß ist es möglich, mehrere Netzarten des Kalibrierobjektes vorzusehen.

Im Beispiel der Fig. 1 ist das Kalibrierobjekt eine Platte 4a, die auf einer Fläche ein Netz 4b von Meßstäben trägt, die jeweils aus einem zylindrischen Zapfen derart geringen Durchmessers besteht, daß das Auftreffen des Lasers eine Helligkeitsstelle hervorruft, der maximal 1, 2 oder 3 Pixeln der Kamera entsprechen. In diesem Fall (Fall kleiner Meßstäbe genannt) kann die Anzahl an Meßstäben 9 bis 25 betragen, wobei die zentralen Meßstäbe (zwischen 3 und 9) als charakteristische Bezugspunkte dienen.

Im Beispiel der Fig. 1a ist das Kalibrierobjekt eine Platte 4d, die auf einer Fläche ein Netz 4e von 4 bis 5 Meßstäben trägt, die jeweils aus einem zylindrischen Zapfen relativ großen Durchmessers bestehen, derart, daß das Auftreffen des Lasers eine Helligkeitsstelle hervorruft, der einem Kreisbogen aus mindestens 20 bis 30 Pixeln der Kamera entspricht. In diesem Fall (Fall dicker Meßstäbe



2a des Roboters trägt, mit dem ein Bezugssystem verbunden ist, das Terminalsystem (R, S, T) genannt wird und dessen Achse R mit der Achse dieses Motors zusammenfällt.

Das Sensorsystem 3 umfaßt ein Beleuchtungssystem 14 und eine Videovorrichtung 15. Das Beleuchtungssystem 14 besteht im Beispiel aus einem Helium-Neon-Röhrenlaser niedriger Leistung 14a, der mit einer zylindrischen Optik 14b und einem Umlenkspiegel 14c verbunden ist, um einen lamellaren Strahl FL auszusenden. Das Beleuchtungssystem 14 ist mit einem Futter mit Bajonettkupplung 16 am Terminalorgan angebracht und mit Einstellmitteln 17 versehen, die die Justierung der Stellung des lamellaren Lichtstrahles ermöglichen. Im Beispiel ist die Stellung dieses Strahles derart geregelt, daß dieser mit der Ebene RT des Terminalsystems (R, S, T) zusammenfällt.

Die Videovorrichtung 15 umfaßt eine CCD-Videokamera 15a, deren Gehäuse durch ein Scharnier 15b am Beleuchtungssystem 14 derart angelenkt ist, daß die optische Aufnahmeachse AO eine konstante Parallaxe PAR relativ zum Lichtstrahl FL aufweist und die Kamera ein Blickfeld hat, das ihr ermöglicht, die Spur des Lasers auf dem beleuchteten Objekt zu filmen. Die Kamera 15a ist mit einem Objektiv 15c ausgestattet, das mit einem Interferenzfilter versehen ist, das auf die Wellenlänge des Lichtstrahles abgestimmt ist.

Die Kamera 15 gibt ein Videosignal an das elektronische Interface 7 ab. Dieses ist mit einer Erfassungskarte 7a versehen, die aus dem Videosignal Rohinformationen (p, q) erzeugt und in einem Speicherbereich 6d speichert, die die durch die Kamera aufgenommenen Echos darstellen, d.h. das Bild der Spur des Lichtstrahles FL auf dem untersuchten Objekt. Diese Karte ist an sich bekannt und kann von der im Patent FR 2.519.138 beschriebenen Art sein; sie gibt an den Rechner 5 Informationen (p, q) in Abhängigkeit von den Spalten (p) und Zeilen (q) der Bilder der Punkte der Spur aus.

Der Rechner 5 enthält ein Modul 5b zur Steuerung des Weges, das über einen Leistungsverstärker 7b des Interface 7 die Drehungen der Motoren 8-13 des Roboters steuert und damit die Position und die Orientierung des Terminalorgans 2a relativ zum Gehäuse 1.



- die Fig. 8a und 8b ähnliche Darstellungen im Fall einer Zwischentransfunktionsfunktion, die auf Elementarzonen definiert ist,

- die Fig. 9a, 9c ähnliche Darstellungen im Fall einer Zwischentransfunktionsfunktion, die durch eine Linearisierungstabelle korrigiert wird, wobei die Fig. 9b das unkorrigierte Echo darstellt,

- Fig. 10 eine perspektivische Teilansicht des Systems während der Eichung (Schritt der Bestimmung des Bezugspunktes) mit Darstellung der Echos während des Schrittes,

- Fig. 11 einen Logikplan, der das Programm zur Auflösung des Gleichungssystems nach  $M_{TC}$  darstellt,

- Fig. 12 ein Schema, das das Modeling der kinematischen Kette des Roboters darstellt, das durch die Matrix  $M_{AT}$  des Überganges vom Terminalsystem zum absoluten Bezugssystem beschrieben wird.

Das in den Fig. 1 und 2 beispielhaft dargestellte Formerfassungssystem besteht im wesentlichen aus sieben Einheiten:

- einem festen Gehäuse 1,
- einem mit dem festen Gehäuse fest verbundenen und mit einem Terminalorgan 2a versehenen sechsachsigen Roboter 2,
- einer Sensoreinheit 3, die vom Terminalorgan 2a getragen wird,
- einem Kalibrierobjekt 4, das seinerseits mit dem festen Gehäuse 1 fest verbunden ist und das in diesem Beispiel auch als Bezugsobjekt verwendet wird, wie unten dargestellt wird,
- einem Rechner 5,
- mit dem Rechner 5 verbundene Speichermittel 6
- und ein elektronisches Interface 7 zwischen der Einheit Roboter/Sensor und dem Rechner.

Der Roboter 2 selbst ist von herkömmlicher Bauart und umfaßt eine Reihe von Betätigungsorganen, die aus einer kinematischen Kette von Motoren besteht, im Beispiel aus sechs: 8, 9, 10, 11, 12 und 13, die sechs Drehungen um sechs Motorachsen ermöglichen. Jeder Motor ist mit einem Sensor der Winkelstellung, insbesondere vom inkrementierenden Typ, wie Sensor 18, verbunden, der Impulse abgibt, die für die Drehung des betreffenden Motors repräsentativ sind. Der Motor 8 ist mit dem Gehäuse fest verbunden, mit dem ein absolut genanntes Bezugssystem (X, Y, Z) verbunden ist, in dem das System die Koordinaten der Punkte der zu erfassenden Form angibt, während der Motor 13 das Terminalorgan



Im Fall einer Eichung, bei der die Matrix  $M_{TC}$  aus verschiedenen Positionen des Terminalorganes berechnet wird, weist das System die folgenden Merkmale auf:

- das genannte System enthält ein Bezugsobjekt, das mindestens einen charakteristischen Punkt aufweist und Mittel zur Befestigung des Bezugsobjektes am Gehäuse,
- die Speichermittel umfassen einen Speicherbereich für die Matrizen  $M_{AT1}, \dots, M_{ATn}$ ,
- der Rechner ist in der Lage und dafür programmiert, das Gleichungssystem nach  $M_{TC}$  aufzulösen.

Weitere Merkmale, Ziele und Vorteile der Erfindung werden aus der folgenden Beschreibung hervorgehen, die auf die beigefügten Zeichnungen Bezug nimmt, die als nicht einschränkende Beispiele Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Eichverfahrens darstellen und eine Ausführungsform eines Erfassungssystems. Es zeigen in diesen Zeichnungen, die einen integralen Bestandteil der vorliegenden Beschreibung darstellen:

- Fig. 1 eine perspektivische Ansicht eines erfindungsgemäßen Erfassungssystems am Beispiel eines sechsachsigen Roboters,
- Fig. 1a eine Variante des Kalibrierobjektes (Fall dicker Meßstäbe),
- Fig. 1b die Bildung eines virtuellen Kalibrierobjektes aus einem einzigen Meßstab,
- Fig. 2 eine Detailansicht der am Terminalorgan des genannten Systems befestigten Sensoreinheit als Teilschnittansicht,
- Fig. 3 ein allgemeines Flußdiagramm der Funktionsweise des Erfassungssystems im Meßbetrieb,
- Fig. 4 eine perspektivische Ansicht des Roboters während der Eichung (Eichungsschritt),
- Fig. 5a einen Logikplan, der das Rechenprogramm für den Fall einer linearen Zwischentransferti-funktion darstellt, und Fig. 5b eine Darstellung des Echos des Kalibrierobjektes in diesem Fall,
- Fig. 5c das Echo des Kalibrierobjektes im Fall der dicken Meßstäbe (Fig. 1a),
- Fig. 6 den Algorithmus der Umsetzung, Aufstellung der Gleichungen und Auflösung im linearen Fall der Fig. 5a,
- Fig. 7a einen Logikplan, der das Rechenprogramm für den Fall einer nichtlinearen Zwischentransferti-funktion darstellt, und Fig. 7b eine Darstellung des Echos,



Für gewisse Anwendungen, die keine Feinkompensierung der Nichtlinearitäten erfordern, bietet die Aufteilung in Elementarzonen einen guten Kompromiß zwischen Präzision und Einfachheit der Berechnung.

Um bei den Eichmessungen den Quantifizierungsfehler aufgrund der Auflösung der Sensoreinheit zu begrenzen, erfolgen die Berechnung der Zwischentransferti-funktion (N) und die Berechnung der Matrix  $M_{TC}$  des Überganges vom Sensor-system zum Terminalsystem vorzugsweise durch Aufstellung abundanter Gleichungssysteme und deren Lösung im Sinne der kleinsten Quadrate.

Die Erfindung erstreckt sich auf ein Erfassungssystem der oben definierten Art, versehen mit Mitteln zur Eichung, die die Anwendung des vorerwähnten Verfahrens ermöglichen:

- ein Kalibrierobjekt, das ein oder mehrere Reliefs bekannter Geometrie und Abmessungen aufweist,
- Mittel zur Befestigung des Kalibrierobjektes am Gehäuse,
- Speichermittel, einen Speicherbereich für die Informationen zur geometrischen Definition des Kalibrierobjektes und einen Speicherbereich für die Matrix ( $M_{TC}$ ) des Überganges vom Sensorsystem zum Terminalsystem enthaltend,
- und einen Rechner, in der Lage und dafür programmiert, die Umsetzung der Informationen zur geometrischen Definition in Koordinaten auszuführen, um die Zwischentransferti-funktion N zu berechnen, und die globale Transferti-funktion L durch Matrizenmultiplikation zu berechnen.

Im Fall einer Eichung, bei der die Matrix  $M_{TC}$  aus den Positionsinformationen des Kalibrierobjektes berechnet wird, weist das System außerdem die folgenden Merkmale auf:

- die Mittel zur Befestigung des Kalibrierobjektes sind dazu eingerichtet, die Befestigung des genannten Kalibrierobjektes in einer vorher festgelegten, bekannten Position relativ zum Gehäuse sicherzustellen,
- die Speichermittel umfassen einen Speicherbereich für die entsprechenden Positionsdaten des genannten Kalibrierobjektes und einen Speicherbereich für die Matrix  $M_{AC}$  des Überganges vom Sensorsystem zum absoluten Bezugssystem,
- der Rechner ist in der Lage und dafür programmiert, die Matrix  $M_{AC}$  zu bestimmen und die Matrix  $M_{TC}$  aus den Matrizen  $M_{AC}$  und  $M_{AT0}$  zu berechnen.



wo  $\begin{vmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{vmatrix}$  die unbekannten Koordinaten des charakteristischen Punktes des Kalibrierobjektes sind, die bei der Lösung des Gleichungssystems durch Substitution eliminiert werden.

Es ist zu beachten, daß das Bezugsobjekt durch das Kalibrierobjekt selbst dargestellt werden kann, bei dem gewisse Meßstäbe als Bezugspunkte dienen.

In dieser Ausführungsform wird die mechanische Positionierung des Kalibrierobjektes durch eine Reihe von Erfassungen charakteristischer Punkte ersetzt, die in verschiedenen, durch die Bewegung der Betätigungsorgane erhaltenen Positionen unter denselben Bedingungen ausgeführt werden, unter denen die tatsächlichen Messungen an einem Objekt erfolgen; diese beliebige Positionierung des Kalibrierobjektes führt zu größerer Flexibilität des Verfahrens (transportables Erfassungssystem, Möglichkeit, das Kalibrierobjekt mit dem zu messenden Objekt zu verbinden etc.).

Im Fall eines Erfassungssystems, in dem die Sensoreinheit ein Beleuchtungssystem enthält, das in der Lage ist, mindestens einen lamellaren Lichtstrahl zum Objekt zu senden, und ein Videosystem, das in der Lage ist, das Objekt mit einer relativ zum Strahl des Beleuchtungssystems konstanten Parallaxe zu filmen, um Rohinformationen (p, q) in Abhängigkeit von den Spalten (p) und Zeilen (q) der Bilder der Punkte der Spur jedes Lichtstrahles auf dem Objekt oder dem Kalibrierobjekt zu liefern, kann die Zwischentransferti-funktion N in linearer Form oder in der nichtlinearen Form einer beschränkten Entwicklung oder auch durch Unterteilung des Kalibrierobjektes in Elementarzonen ausgedrückt werden, die linear oder nichtlinear behandelt werden, oder auch durch Ausführung einer Korrektur der Verzerrungen des Systems mittels einer Linearisierungstabelle.

Die lineare Form ist ausreichend, wenn die Brennweiten der Videovorrichtungen hinreichend groß sind, um die optischen Aberrationen zu begrenzen. Die nichtlineare Form ermöglicht es, Videovorrichtungen zu berücksichtigen, die erhebliche Verzerrungen oder Optiken mit Anamorphose aufweisen.

Wenn diese Verzerrungen leicht zu beschreiben sind oder durch die Konstruktion geliefert werden, sind die Korrekturen durch Linearisierungstabellen vorzuziehen.



In der Folge wird mit "Kalibrierobjekt" ebenso das materielle Kalibrierobjekt mit mehreren Meßstäben bezeichnet, wie das virtuelle Kalibrierobjekt, das wie oben angegeben aus einem einzigen Meßstab gebildet wird.

Im übrigen wird einer ersten Ausführungsform gemäß die Matrix  $M_{TC}$  des Übergangs vom Sensorsystem (U, V, W) zum Terminalsystem bestimmt,

- indem das Kalibrierobjekt in einer vorher festgelegten, bekannten Position auf dem festen Gehäuse befestigt wird und die entsprechenden Daten gespeichert werden,

- indem aufgrund dieser Daten eine Matrix  $M_{AC}$  des Überganges vom Sensorsystem (U, V, W) zum absoluten Bezugssystem (X, Y, Z) für die Kalibrierposition bestimmt und gespeichert wird,

- indem die von den Bestimmungsmitteln in der Kalibrierposition gelieferte Matrix  $M_{AT}$  gespeichert wird, die mit  $M_{AT0}$  bezeichnet wird,

- und indem die Matrix  $M_{TC}$  aus den oben genannten Matrizen berechnet wird:  $M_{TC} = (M_{AT0})^{-1} \cdot M_{AC}$ .

So ist in dieser Ausführungsform der absolute Bezugspunkt durch eine präzise und vollständig bekannte Befestigung des Kalibrierobjektes am Gehäuse gegeben, Befestigung, die ohne Schwierigkeiten durch bekannte mechanische Positionierungsmittel sichergestellt werden kann.

Dieser Zwang zur präzisen Befestigung des Kalibrierobjektes kann jedoch durch Ausführung eines anderen Verfahrens zur Bestimmung der Matrix  $M_{TC}$  vermieden werden, das darin besteht,

- mindestens einen charakteristischen Punkt eines Bezugsobjektes in I Positionen der Sensoreinheit zu erfassen, um die die entsprechenden Echos darstellenden Rohinformationen ( $p_1, q_1, \dots, p_k, q_k, \dots, p_I, q_I$ ) zu erhalten,

- mittels der Zwischentransferrfunktion N die entsprechenden Koordinaten ( $u_1, v_1, w_1, \dots, u_k, v_k, w_k, \dots, u_I, v_I, w_I$ ) im Sensorsystem zu berechnen,

- die für jede der Erfassungspositionen von den Bestimmungsmitteln gelieferten Matrizen ( $M_{AT1}, \dots, M_{ATk}, \dots, M_{ATI}$ ) zu speichern,

- das folgende Gleichungssystem zu lösen, um die Unbekannte  $M_{TC}$  zu berechnen:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = [M_{ATk}] \cdot M_{TC} \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \\ w_k \end{bmatrix} \quad 1 \leq k \leq I$$



die Zwischentransfertiunktion  $N$  mit einerseits der Übergangsmatrix  $M_{TC}$  und andererseits der Übergangsmatrix  $M_{AT}$  zu multiplizieren und die globale Transfertiunktion  $L = M_{AT} \cdot M_{TC} \cdot N$  zu erhalten.

Auf diese Weise wird im erfindungsgemäßen Verfahren die Kenntnis der geometrischen Parameter der Sensoreinheit (die schwer und nur ungenau gemessen werden können) durch die eines einfachen und leicht präzise zu bemaßenden Kalibrierobjektes ersetzt. Die Aufstellung der Zwischentransfertiunktion erfolgt direkt durch eine Erfassung der Rohinformationen unter denselben Bedingungen, wie die späteren Messungen der Punkte eines Objektes, so daß dadurch die Fehlerhäufung vermieden wird (da die Fehler der tatsächlichen Messung durch die identischen Fehler kompensiert werden, die bei der Erfassung des Kalibrierobjektes auftreten).

Das Kalibrierobjekt kann insbesondere ganz einfach aus einer Platte bestehen, die auf einer Seite ein Netz von Meßstäben trägt. Die Informationen zur Definition des Kalibrierobjektes bestehen dann aus den Koordinaten  $(u_k, v_k)$  jedes Meßstabes in einem Bezugssystem des Kalibrierobjektes  $(U, V)$ , das sich in der Ebene der Fläche des Kalibrierobjektes befindet, die das Netz von Meßstäben trägt.

Im Fall eines quadratischen Netzes genügt eine einzige Information, nämlich der Rasterschritt des Netzes.

Es ist ebenfalls möglich, ein virtuelles Kalibrierobjekt aus einem einzigen Meßstab zu bilden, indem die Sensoreinheit in mehreren bekannten Eichpositionen angeordnet wird, indem als definierende Information Koordinaten  $(u_k, v_k)$  gespeichert werden, die in den verschiedenen Eichpositionen in einem mit der Sensoreinheit verbundenen Bezugssystem  $(U, V)$  verbunden sind, indem die Echos des einzigen Meßstabes, die von der Sensoreinheit in den verschiedenen Eichpositionen erfaßt werden, darstellenden Rohinformationen  $(p, q, \dots)$  gespeichert werden und indem diese Rohinformationen zusammengesetzt werden, um ein virtuelles Netz zu bilden, das das virtuelle Kalibrierobjekt darstellt.

Diese Art der Durchführung vereinfacht noch die materielle Ausführung des Kalibrierobjektes, indem die mechanischen Bewegungen der Sensoreinheit verwendet werden.



Ein anderes Ziel ist es, einen Übergang zum absoluten Bezugssystem des Gehäuses zu ermöglichen, ohne die Merkmale der Befestigung oder des Anflanschs der Sensoreinheit am beweglichen Terminal zu kennen, der sie trägt.

Die Erfindung beabsichtigt dadurch, die möglichen Bewegungen des Systems zu erweitern, indem die Sensoreinheit (in an sich bekannter Weise) auf einem beliebigen beweglichen Terminalorgan (Roboter, Werkzeugmaschine etc.) angeordnet werden kann, dessen Kinematik selbst vorbestimmt ist.

Zu diesem Zweck besteht das Verfahren zur Eichung eines Systems zur Formerfassung des vorgenannten Typs zur Aufstellung der globalen Transferti-funktion zwischen den zurückgeworfenen Echos und den entsprechenden absoluten Koordinaten (x, y, z), die das Erfassungssystem ausgeben soll, darin,

- vorab Informationen geometrischer Art über ein Kalibrierobjekt zu speichern, das ein oder mehrere Reliefs bekannter Geometrie und Abmessungen aufweist,

- die Form des genannten Kalibrierobjektes mittels der Sensoreinheit zu erfassen, die in mindestens einer bestimmten Position relativ zum genannten Kalibrierobjekt, Eichposition(en) genannt, angeordnet ist, um die entsprechenden Rohinformationen (p, q...), die die von der genannten Sensoreinheit erfaßten Echos darstellen, zu speichern,

- für jede genannte Eichposition die das Kalibrierobjekt definierenden Informationen in Form von Koordinaten (u, v, w) in ein mit dem Sensor verbundenes und Sensorsystem (U, V, W) genanntes Bezugssystem umzusetzen,

- aus den Ergebnissen der genannten Erfassung und den das Kalibrierobjekt charakterisierenden Koordinaten (u, v, w) im Sensorsystem eine Zwischentransferti-funktion

$$N \begin{cases} u = F(p, q...) \\ v = G(p, q...) \\ w = H(p, q...) \end{cases}$$

zu berechnen, die die Koordinaten (u, v, w) im Sensorsystem (U, V, W) in Abhängigkeit von den Rohinformationen (p, q) liefert,

- die Position des Sensorsystems (U, V, W) im Terminalsystem (R, S, T) zu bestimmen und eine Matrix  $M_{TC}$  für den Übergang vom Sensorsystem zum Terminalsystem zu speichern,



Diese Systeme weisen ein bislang schlecht gelöstes Problem auf, das darin besteht, die von der Sensoreinheit gelieferten Rohinformationen (die von dieser Sensoreinheit abhängig sind) mit den tatsächlichen Positionen der Punkte der Oberfläche des Objektes (unabhängig von der Sensoreinheit, die die Erfassung ermöglicht hat) in Beziehung zu setzen, d.h. aus diesen Rohinformationen die metrischen Koordinaten dieser Punkte in einem bestimmten Bezugssystem zu gewinnen.

Die bekannten Systeme, insbesondere vom oben erwähnten Typ, stellen die Beziehung zwischen den Rohinformationen und den tatsächlichen Koordinaten der Punkte durch vorherige Kenntnis der Geometrie des Beleuchtungssystems relativ zur Videovorrichtung her (vorherige Bestimmung der Parallaxe, der Brennweite des Objektivs, der Eigenschaften des photosensiblen Bauteiles etc.). Diese Systeme machen also die Messung der Gesamtheit dieser Parameter erforderlich, um sie zu eichen, was in der Praxis schwierig ist und eine Fehlerquelle darstellt und zu komplexen trigonometrischen Berechnungen mit Fehlerhäufung führt. Dadurch ist die Transferrfunktion zwischen den Rohinformationen und den tatsächlichen Koordinaten nur approximativ. Um die absoluten Koordinaten der Punkte der Oberfläche zu erhalten, müssen außerdem die Positionsmerkmale der (beweglichen) Sensoreinheit relativ zum mit dem Gehäuse verbundenen absoluten Bezugssystem bestimmt werden und die bekannten Erfassungssysteme können diesen Übergang nur für einfache Bewegungen der Betätigungsorgane ausführen, die einfachen und vollkommen definierten Relativbewegungen der Sensoreinheit (reine Drehung oder Translationsbewegung der Sensoreinheit relativ zum Objekt) entsprechen. Diese Einschränkung schränkt den möglichen Meßbereich des Systems ein, und dies kann ein Hauptnachteil bei Objekten komplexer Form sein.

Die Erfindung zielt darauf ab, ein neues Eichverfahren zu schaffen, das es erlaubt, die oben erwähnten Nachteile der bekannten Formerfassungssysteme zu überwinden.

Ein Ziel der Erfindung ist insbesondere, eine Eichung zu schaffen, die vom inneren Aufbau der Sensoreinheit unabhängig ist und die dementsprechend keine vorherige physische Messung ihrer geometrischen Parameter erfordert.